



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

ANA KARLA BATISTA DA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS IMPLANTADAS NO ESTACIONAMENTO DA ESCOLA
POLITÉCNICA (POLI - UPE)**

Recife, PE

2022



UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO
ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

ANA KARLA BATISTA DA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS IMPLANTADAS NO ESTACIONAMENTO DA ESCOLA
POLITÉCNICA (POLI - UPE)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientador (a): Profa. Dra. Yêda Vieira Póvoas

Co-orientador: Prof. Dr. José Orlando Vieira Filho

Recife, PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Universidade de Pernambuco

S586a Silva, Ana Karla Batista da
Análise do desempenho de estruturas de pavimentos permeáveis implantadas no estacionamento da Escola Politécnica (POLI-UPE). / Ana Karla Batista da Silva. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2022.

172 f.: il.

Orientadora: Profa. Dra. Yêda Vieira Póvoas
Co-Orientador: Prof. Dr. José Orlando Vieira Filho

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

1. Pavimentos Permeáveis. 2. Permeabilidade. I. Engenharia Civil - Dissertação. II. Póvoas, Yêda Vieira (orient.). III. Vieira Filho, José Orlando (co-orient.). IV. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. V. Título.

CDD: 690.028

ANA KARLA BATISTA DA SILVA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS IMPLANTADAS NO
ESTACIONAMENTO DA ESCOLA POLITÉCNICA (POLI-UPE)**

BANCA EXAMINADORA:

Orientadora



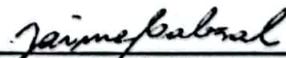
Profa. Dra. Yêda Vieira Póvoas
Universidade de Pernambuco

Coorientador



Prof. Dr. José Orlando Vieira Filho
Universidade de Pernambuco

Examinadores



Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Universidade de Pernambuco



Profa. Dra. Mariana Lobo Marchioni
Politecnico di Milano

Recife-PE
2022

DEDICATÓRIA

A Deus, aos meus familiares e amigos.

A minha mãe (Selma Angelina) e meu padrasto (José Henrique)

Ao meu pai Carlos Antônio (*In Memoriam*)

A minha tia Maria Angelina (*In Memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela presença constante ao meu lado, e por me dar força e coragem para seguir adiante em todos os momentos. Aos meus familiares, em especial a minha mãe Selma Angelina, ao meu padrasto José Henrique, e minhas primas irmãs (Sintia, Catarina, Sheyla e Jéssica) por todo o apoio que me foi dado e pela compreensão nos momentos de ausência.

À Profa. Dra. Yêda Vieira Póvoas pela sua disponibilidade, orientação e avaliação criteriosa, e constante estímulo transmitido durante a elaboração desta dissertação, bem como sua dedicação para sanar dúvidas e contribuir da melhor forma para a pesquisa, por todas as correções e sugestões que foram extremamente enriquecedoras. Ao Prof. José Orlando, por co-orientar este trabalho e disponibilizar o laboratório da JOVENgeharia para a execução dos ensaios necessários para o desenvolvimento desta pesquisa. E a toda equipe da JOVENgeharia, em especial ao Sr. Adelson, Anderson, Marinho, Max, Rivaldo, Washington, Allan, Guilherme e Raphael por auxiliarem nos ensaios realizados e pelos momentos de descontração e apoio técnico.

Ao Prof. Jaime Cabral, por disponibilizar seu tempo para sanar dúvidas, pelo interesse em contribuir da melhor forma para a elaboração desta pesquisa, pelos momentos de fé partilhados durante o Terço da POLI, e pela generosidade em participar como examinador desta pesquisa. Ao Prof. Alexandre Gusmão, pela colaboração no desenvolvimento desta pesquisa. Da mesma forma, agradeço à Prof. Mariana Marchioni pela sua disponibilidade, por compartilhar todo o seu conhecimento sobre o tema abordado, e pela generosidade em participar como examinadora desta pesquisa.

Aos meus amigos, especialmente Marcos Barbosa, Thaísa Macêdo, Camilla Pires, Kelly Afro, Cristina Lima, Maria Angélica, Maria Rafaela, Gabriela e Elvis por todo o apoio e pelos momentos de diversão partilhados. As amigas do Mestrado da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI-UPE), Débora Valões e Edenia Barros, por acreditarem em mim e por todo apoio que me foi dado durante o desenvolvimento da pesquisa.

À Geosistemas Engenharia e Planejamento Ltda (Empresa de Consultoria em Projetos de Infraestrutura Urbana), em especial às minhas gerentes Ângela Paula, Anelise Pereira e Andrea Lapenda, pela compreensão nos momentos de ausência, pelos conhecimentos que me foram atribuídos no âmbito dos Projetos de Infraestrutura Urbana (Terraplenagem, Pavimentação e Drenagem), bem como pela disponibilidade da equipe de topografia (Will, Nildo, Aristides, Miguel, Edilson e Evaristo). E aos amigos de trabalho Alisson Caetano, Josefa Siqueira (Pipoca), Armindo Negromonte, Ranieri Aguiar, Alexandre Cavalcanti, Dayana, Robson, Danilo, Michelle Kiemle, Eduarda, Jorge, Elísia Claudia, Kelly Afro, Anderson, Tiago Evaristo, Miguel, Raphael, Felipe, Mizael (Jovem) e Leandro por todo o apoio, momentos de descontração e conhecimentos partilhados.

À empresa Ciclo Ambiental, em especial a Flávio, pelas informações repassadas em visita técnica e pela atenção. À Pedreira Guarany e a AGR ambiental, pelo fornecimento de amostras para realização dos ensaios de granulometria. À GEOCOM comercial ltda, pelo fornecimento de material para a execução da pista experimental.

À Concrepoxi Artefatos, especialmente a Renata e a Hugo pelo apoio e fornecimento de materiais. À Construtora G-10, em especial ao Sr. Luisinho e sua equipe (Dinho, Kevin e irmão) pelo zelo e comprometimento durante a execução dos serviços. À EMLURB (Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana), especialmente ao diretor Sérgio, pela atenção e disponibilidade.

Ao Sr. Jarbas (Porteiro da POLI), César e Macgyver pela amizade, por toda a sua atenção e prestatividade em todos os momentos. A Diva pelos momentos partilhados. E por fim, agradeço a Oficina do Guaraná, em especial a Alex e Márcia, por todo o apoio e pelos lanches.

“O que não te desafia, não te transforma”.
(Fred Devito)

RESUMO

A Urbanização, crescente e desordenada, nas cidades contribui para a diminuição da permeabilidade dos terrenos e provoca inúmeras alterações no ciclo hidrológico, agravando os processos de erosão e de inundações urbanas. No intuito de minimizar os impactos gerados pelas inundações, têm sido implantadas técnicas compensatórias eficazes e sustentáveis, dentre elas estão os pavimentos permeáveis. Diante desse contexto, este trabalho tem por objetivo analisar o desempenho de 4 diferentes tipos de estruturas de pavimentos permeáveis implantadas no estacionamento da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI-UPE). As estruturas analisadas foram constituídas pelos seguintes materiais: revestimento em peça de concreto permeável e base composta por brita reciclada RCD – Resíduos da construção civil e demolição (E1); revestimento em peça de concreto permeável e base composta por brita convencional (E2); revestimento em concreto permeável com camadas de base/sub-base compostas por materiais em RCD e subleito com substituição parcial por areia grossa reciclada (E3); revestimento em concreto permeável com camadas de base/sub-base compostas por materiais em RCD (E4). Baseando-se nos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015), foi realizada a caracterização da área de estudo, bem como dos materiais utilizados nas camadas do pavimento. As estruturas de pavimentos permeáveis implantadas foram avaliadas quanto à permeabilidade, no intuito de verificar o desempenho das mesmas, e definir qual a estrutura mais eficiente. Diante dos resultados apresentados, verificou-se que as divergências encontradas quanto à capacidade de absorção de água e resistência dos agregados (britas recicladas e convencional) não interferiram significativamente no desempenho das estruturas (E1 e E2), tendo em vista que a permeabilidade das mesmas são similares. Comparando-se o desempenho das estruturas com revestimento em intertravado permeável (E1 e E2) com o das estruturas com revestimento em concreto permeável (E3 e E4) verificou-se que todas apresentam desempenho similares quanto à resistência e a permeabilidade. No que diz respeito à durabilidade dos pavimentos permeáveis, verificou-se que a implantação de técnicas de manutenção são eficazes para recuperar a permeabilidade do pavimento, como no caso das estruturas revestidas em concreto permeável (E3 e E4) que foram analisadas neste trabalho. Desta forma, ressalta-se a importância da realização de manutenção periódica para evitar a colmatação e manter a vida útil dos pavimentos permeáveis.

Palavras-chave: Pavimentos permeáveis. Permeabilidade. Desempenho.

ABSTRACT

Urbanization, growing and disordered, in cities contributes to the reduction of the land's permeability and causes countless changes in the hydrological cycle, aggravating the erosion's processes and urban flooding. In order to minimize the impacts generated by floods, effective and sustainable compensatory techniques have been implemented, including permeable pavements. In this context, the objective of this work is to analyze the performance of 4 different types of permeable pavement structures implanted in the parking lot of the Escola Politécnica de Pernambuco (POLI-UPE). The structures analyzed were constituted by the following materials: covering with a permeable concrete piece and base composed by recycled gravel RCD – Civil construction and demolition waste (E1); covering with a permeable concrete piece and base composed of conventional gravel (E2); permeable concrete coating with base/subbase layers composed of RCD materials and subgrade with partial replacement by recycled coarse sand (E3); permeable concrete covering with base/sub-base layers composed of RCD materials (E4). Based on the requirements established by ABNT NBR 16416 (2015), the characterization's area study was performed, and the materials used in the pavement layers. The permeable pavement structures implemented were evaluated for permeability, in order to verify their performance, and define which structure is more efficient. In view of the results presented, it was verified that the differences between the water absorption capacity and resistance of the aggregates (recycled and conventional gravel) did not significantly interfere in the performance of the structures (E1 and E2), considering that their permeability are similar. Comparing the performance of structures with permeable interlock covering (E1 and E2) with the structures of permeable concrete covering (E3 and E4) checked that all of them present similar performance in terms of strength and permeability. In terms of permeable pavements durability, checked that the maintenance techniques implementation are effective to restore the permeability of the pavement, in case of structures covered in permeable concrete (E3 and E4) that were analyzed in this work. In this way, emphasizes the importance to do performing periodic maintenance to avoid clogging and maintain the permeable pavements life.

Keywords: Permeable pavements. Permeability. Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - População urbana e rural no Brasil.....	28
Figura 2 - A influência da urbanização na drenagem natural.....	29
Figura 3 – Chuva do dia 13/05/2021 em Recife/PE.....	29
Figura 4 – Cenários de hidrogramas para bacia natural, bacia urbanizada e bacia urbanizada com aplicação de BMP.....	30
Figura 5 – Seção tipo genérica do pavimento permeável.....	31
Figura 6 - Aplicações do pavimento permeável.....	33
Figura 7 - Configuração do pavimento em greide inclinado, diferença do armazenamento temporário da água em greide inclinado ou plano.....	35
Figura 8 - Implantação de pavimentos permeáveis: Westmoreland – EUA (A); Vancouver (Canadá) (B); Parque Duppigheim (Portugal) (C).	36
Figura 9 - Calçada do Jockey Club em São Paulo (Brasil).	37
Figura 10 - Caso em Recife/PE: implantação de revestimento permeável (A); Elaboração de projeto de pavimento permeável (B).	38
Figura 11 - Sistemas de Infiltração Total.	46
Figura 12 - Sistema de Infiltração Parcial.	47
Figura 13 - Sistema sem Infiltração.....	47
Figura 14 - Tipos de revestimentos dos pavimentos permeáveis de concreto.....	48
Figura 15 - Tipos de revestimentos dos pavimentos permeáveis de concreto não citados na ABNT NBR 16416 (2015).	49
Figura 16 - Estruturas dos pavimentos permeáveis com revestimento em peças/placas de concreto e concreto permeável.	51
Figura 17 - Estrutura do pavimento truegridpaver.	52
Figura 18 - Estrutura do pavimento CPA.	52
Figura 19 – Determinação da taxa de infiltração com infiltrômetro de anel simples.....	54
Figura 20 – Prova de carga estática.....	57
Figura 21 – Fluxograma de decisão da análise estrutural e hidrológica de pavimento permeável.	58
Figura 22 - Dimensionamento hidráulico.....	61
Figura 23 - Manifestações Patológicas dos pavimentos permeáveis: placa bailarina (A), junta colmatada (B) e aparecimento de vegetação (C).	64

Figura 24 - Equipamentos utilizados para manutenção: nas calçadas em Recife (A), varrição em quintais (B) e em vias (C).....	67
Figura 25 – Métodos para determinação do coeficiente de permeabilidade: A (campo); B (ABNT NBR 13292) e C (ISO 17785-1).	71
Figura 26 – Superfícies analisadas.	73
Figura 27 – Percentagem (%) de água infiltrada e escoada superficialmente com uma precipitação de 236,62 mm acumulada no período.	74
Figura 28 – Resistência à compressão (dividido por 10) e resistência à tração na flexão em função da variação do índice de vazios).	75
Figura 29 – Relação entre porosidade e resistência à compressão.	78
Figura 30 - Processo de seleção dos artigos.	82
Figura 31 - Recife: cidade intercortada pelos rios.	89
Figura 32 - Localização dos pontos de alagamentos no Recife.....	90
Figura 33 - Mapa de situação da (POLI - UPE).	91
Figura 34 - Alagamento no estacionamento da (POLI - UPE).....	91
Figura 35 - Locação das pistas experimentais (E1, E2, E3 e E4) no estacionamento da POLI – UPE.....	92
Figura 36 - Levantamento topográfico do estacionamento da POLI – UPE.....	93
Figura 37 - Locação das estruturas de pavimento – E1 e E2 (POLI - UPE).	93
Figura 38 - Estudo geotécnico: equipamentos utilizados (A), execução do furo de sondagem (B) e furo (C).	94
Figura 39 - Perfil Geotécnico (POLI - UPE) realizado em 11/12/19.	94
Figura 40 - Ensaio de sedimentação: densímetro (A), amostras (B), picnômetro (C).	95
Figura 41 - Determinação do limite de liquidez e plasticidade: equipamentos (A) e amostra (B).....	96
Figura 42 - Ensaio de compactação: moldagem do cilindro (A) e determinação da umidade (B).....	96
Figura 43 - Determinação do CBR: cilindro submerso no tanque (A) e leitura na prensa (B).97	97
Figura 44 - Determinação GC e da umidade do subleito.	97
Figura 45 - Taxa de infiltração do subleito: ensaio em 03 pontos distintos (A) e infiltrômetro - anel simples (B).	98
Figura 46 - Ensaio de sedimentação: preparação do corpo de prova (A) e saturação do corpo de prova (B).....	98
Figura 47 - Evento de chuva do dia 13/06/2019.....	100

Figura 48 - Estacionamento da POLI no dia 05/12/2019.....	101
Figura 49 - Estruturas em intertravado permeável (E1 e E2).....	103
Figura 50 - Estruturas em concreto permeável (E3 e E4).....	104
Figura 51 - Materiais utilizados nas estruturas (E1 e E2) do pavimento.....	104
Figura 52 - Análise granulométrica dos materiais: quarteamento da amostra (A), seleção de peneiras (B), granulometria (C).....	105
Figura 53 - Determinação da absorção de água dos agregados: remoção da água superficial (A), pesagem do material saturado (B).....	106
Figura 54 - Determinação da abrasão los angeles.	107
Figura 55 - Determinação do índice do volume de vazios (E_v): Compactação do material (A e B) e Pesagem (C)......	108
Figura 56 - Manta geotêxtil do tipo não-tecido R-16.	109
Figura 57 - Implantação de piezômetros no estacionamento da POLI/UPE: P1 (A), P2(B), P3 (C), A1(D), A2 (E), P4 (F).	111
Figura 58 - Amostra 1: areia argilosa avermelhada.....	112
Figura 59 - Amostra 2: areia média cinza clara – RCC.....	113
Figura 60 - Amostra 3: areia média avermelhada.....	113
Figura 61 - Amostra 4: areia média cinza clara.....	114
Figura 62 - Limite de liquidez da Amostra 1.....	115
Figura 63 - Determinação dos limites LL e LP da Amostra 2: aparelho Casagrande (A) e amostra NL/NP (B).....	116
Figura 64 - Compactação da camada de subleito.	117
Figura 65 - Determinação do CBR do subleito.	117
Figura 66 - Curvas de infiltração nos pontos ensaiados.	118
Figura 67 - Precipitação no dia 13.06.2019.....	120
Figura 68 - Seção tipo do pavimento das estruturas (E1 e E2).	125
Figura 69 - Seção tipo do pavimento das estruturas (E3 e E4).	126
Figura 70 - Inspeção das peças de intertravado permeável.	131
Figura 71 - Avaliação dimensional das peças: comprimento (A), largura (B) e espessura (C).	131
Figura 72 - Absorção de água das peças: retirada das peças do tanque (A), peso úmido (B), secagem na estufa (C), peso seco (D).....	133
Figura 73 - Resistência à compressão das peças: capeamento (A), marcação do eixo (B), rompimento das peças (C).	134

Figura 74 - Coeficiente de permeabilidade da peça: vedação com massa de calafetar (A), ensaio (B).....	135
Figura 75 - Demolição de piso existente.	136
Figura 76 - Execução das etapas de terraplenagem: escavação (A), verificação da taxa de infiltração (B), compactação do subleito (C) e verificação do GC e da umidade do subleito.	137
Figura 77 - Execução das etapas de pavimentação: implantação da manta geotêxtil (A), molhagem da camada de base (B), compactação da camada de base (C) e camada de base concluída (D).	138
Figura 78 - Execução das etapas de pavimentação: implantação de meio-fio (A), execução da camada de assentamento (B).	139
Figura 79 - Execução da camada de revestimento (A e B) e rejuntamento (C e D).....	139
Figura 80 - Etapas da manutenção na estrutura de pavimento de concreto permeável: varrição manual (A), equipamento de sucção (B), aplicação de jato de água (C), coeficiente de permeabilidade (D).	141
Figura 81 - Resultados dos coeficientes de permeabilidade antes e após a manutenção.	142
Figura 82 - Monitoramento do nível d'água no ponto (P4) na estrutura E3 e no ponto (A2) na estrutura E2.....	142
Figura 83 - Etapas do ensaio para verificação do coeficiente de permeabilidade da estrutura de pavimento: demarcação da área do ensaio (A), vedação do anel de infiltração com a massa de calafetar (B), pontos ensaiados (C), pré-molhagem (D) e ensaios (E e F).	143
Figura 84 - Resultados do coeficiente de permeabilidade para as estruturas (E1 e E2).	144
Figura 85 – Planta baixa do estacionamento da POLI/UPE.....	166
Figura 86 – Planta da Bacia de contribuição.	167
Figura 87 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Dezembro (2020).	168
Figura 88 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Janeiro (2021).	168
Figura 89 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Fevereiro (2021).	169
Figura 90 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Março (2021).	169
Figura 91 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Abril (2021).	170
Figura 92 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Maio (2021).	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grau de Permeabilidade do solo, conforme os coeficientes de permeabilidade.....	53
Tabela 2 - Especificação para os materiais das camadas do pavimento.....	55
Tabela 3 - Distribuição granulométrica recomendada para os materiais das camadas do pavimento.	55
Tabela 4 - Custos de Implantação, Operação e Manutenção (R\$/Ano) de pavimentos permeáveis.....	67
Tabela 5 - Resumo dos custos (R\$/km).....	68
Tabela 6 - Custos e durabilidades esperados para pavimentos novos.	69
Tabela 7 - Determinação do coeficiente de permeabilidade.....	70
Tabela 8 – Resultados dos coeficientes de escoamento nas superfícies analisadas.	73
Tabela 9 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.	75
Tabela 10 – Materiais para a base e as suas porosidades.	79
Tabela 11 - Resumo dos artigos selecionados.	82
Tabela 12 - Ensaios para caracterização do solo.	95
Tabela 13 - Estruturas de pavimento permeável analisadas.	103
Tabela 14 - Propriedades dos materiais constituintes das estruturas do pavimento.	105
Tabela 15 -Propriedades para verificação de conformidade das peças de intertravado permeável.	109
Tabela 16 - Classificação do solo das Amostras 1, 2, 3 e 4 segundo ASTM.	114
Tabela 17 - Classificação do solo pelo sistema TRB.	115
Tabela 18 - Ensaios para caracterização da camada do subleito.	116
Tabela 19 - Grau de compactação e umidade da camada de subleito.	118
Tabela 20 - Coeficientes de permeabilidade do subleito (k).	119
Tabela 21 – Resultados dos ensaios realizados com o solo do subleito.....	121
Tabela 22 - Distribuição granulométrica da camada de base - brita reciclada.	126
Tabela 23 - Distribuição granulométrica da camada de base - brita convencional.	127
Tabela 24 - Distribuição granulométrica da camada de assentamento (pedrisco).	128
Tabela 25 - Distribuição granulométrica da camada de rejuntamento (areia).....	128
Tabela 26 – Resultados dos ensaios realizados com os agregados da camada de base.....	129
Tabela 27 - Características da manta geotêxtil bidim RT-16.	130
Tabela 28 - Amostragem das peças para ensaio.	130
Tabela 29 - Resultados da avaliação dimensional das peças de intertravado permeável.....	132

Tabela 30 - Valores de absorção de água das peças.	133
Tabela 31 - Resultados da resistência à compressão das peças.	134
Tabela 32 - Coeficiente de permeabilidade das peças de intertravado permeável.	135
Tabela 33 – Custos para implantação das estruturas revestidas com intertravado (E1 e E2).	140
Tabela 34 – Resumo dos ensaios realizados.	145
Tabela 35 – Dados mensais de precipitação (Dezembro/2020 a Maio/2021).	171

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais dispositivos legais vigentes no Brasil.....	40
Quadro 2 – Classificação dos pavimentos com funções compensatórias em drenagem pluvial.	45
Quadro 3 - Materiais constituintes das camadas de pavimentos permeáveis.....	53
Quadro 4 - Periodicidade da manutenção.....	66
Quadro 5 - Diferença entre as propriedades dos agregados reciclados e dos agregados naturais.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AQUA	Alta Qualidade Ambiental
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BMPs	Best Management Practices
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CBR	California Bearing Ratio
CCA	Agregados de concreto triturados
C-EPS	Grânulos de poliestirenos expandidos delimitados por cimento
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CPA	Camada Porosa de Atrito
CN	Curve Number
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMLURB	Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana
EPA	Agência de Proteção Ambiental
EUA	Estados Unidos da América
GC	Grau de compactação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade, Duração e Frequência
IF	Índice de Fôrma
IP	Instrução de Projeto
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LID	Low Impact Development
LUOS	Lei do Uso e Ocupação do Solo
MDT	Modelo Digital de Terreno
MUNIC	Pesquisa de Informações Básicas Municipais

NPDES	National Pollutant Discharge Elimination System
NRMCA	National Ready Mixed Concrete Association
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PBQP-H	Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat
PDDR	Plano Diretor do Recife
PDDU	Planos Diretores de Drenagem Urbana
PDU	Planos Diretores de Urbanização
PEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PET	Politereftalato de Etileno
PMAP	Planos de Manejo de Águas Pluviais
POLI	Escola Politécnica de Pernambuco
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses
PROADMI	Pró-Reitoria de Administração e Finanças
PVC	Policloreto de Vinila
RCD	Resíduos de Construção Civil e Demolição
RCD-R	Resíduos de Construção Civil e Demolição Reciclados
RCS	Resistência à compressão simples
RMR	Região Metropolitana do Recife
RT	Resistência à Tração Longitudinal
TiO ₂	Dióxido de Titânio
TRB	Transportation Research Board
TSN	Taxa de Solo Natural
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UPE	Universidade de Pernambuco
USGBC	United States Green Building Council
VDM	Volume Diário Médio
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico
WSUD	Water Sensitive Urban Design
ZUP	Zona de Urbanização Preferencial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Contextualização	23
1.2	Justificativa	23
1.3	Objetivos	25
1.3.1	Objetivo geral	25
1.3.2	Objetivos específicos.....	25
1.4	Estrutura do trabalho	26
2	REFERENCIAL TEÓRICO	27
2.1	A urbanização e os impactos no meio urbano.....	27
2.1.1	Impactos na drenagem urbana.....	28
2.1.2	Impactos na geração de resíduos.....	31
2.2	Pavimento permeável.....	32
2.2.1	Vantagens e desvantagens	33
2.2.2	Breve histórico da utilização de concreto permeável nos pavimentos	35
2.2.3	Normas e legislações municipais vigentes	38
2.2.4	Aspectos de sustentabilidade associados ao pavimento permeável	42
2.2.5	Classificação dos pavimentos permeáveis	45
2.2.5.1	Quanto à função compensatória em drenagem pluvial	45
2.2.5.2	Quanto ao sistema de infiltração	46
2.2.5.3	Quanto ao tipo de revestimento.....	48
2.2.5.4	Quanto ao tipo de tráfego	50
2.2.6	Estruturas dos pavimentos permeáveis	51
2.2.6.1	Tipos de estruturas	51
2.2.6.2	Caracterização dos materiais constituintes das camadas.....	52
2.2.6.3	Avaliação das estruturas de pavimentos permeáveis	56
2.2.7	Diretrizes para elaboração dos projetos e execução dos pavimentos permeáveis	57
2.2.7.1	Requisitos gerais de projeto	58
2.2.7.2	Dimensionamento	59
2.2.7.3	Execução	63
2.3	Manifestações patológicas, conservação e manutenção dos pavimentos permeáveis	63
2.4	Custos para implantação e manutenção dos pavimentos permeáveis	67
2.5	Desempenho dos pavimentos permeáveis.....	69

2.5.1 Desempenho hidráulico	69
2.5.1.1 Determinação do coeficiente de permeabilidade	70
2.5.1.2 Verificação da redução do escoamento superficial ou run-off.....	72
2.5.2 Desempenho mecânico.....	74
2.5.3 Determinação das propriedades físicas dos materiais	76
2.6 Revisão sistemática por método PRISMA.....	80
3 MATERIAIS E MÉTODOS	88
3.1 Delineamento da pesquisa.....	88
3.2 Caracterização da região de estudo	88
3.2.1 Localização.....	88
3.2.2 Levantamento topográfico	92
3.2.3 Ensaio para caracterização do solo	94
3.2.3.1 Estudo geotécnico	94
3.2.3.2 Análise granulométrica	95
3.2.3.3 Determinação do limite de liquidez e de plasticidade.....	96
3.2.3.4 Ensaio de compactação	96
3.2.3.5 Índice de suporte califórnia (ISC) - método de ensaio.....	96
3.2.3.6 Verificação do grau de compactação do subleito.....	97
3.2.3.7 Verificação da taxa de infiltração do subleito.....	97
3.2.3.8 Determinação do coeficiente de permeabilidade do solo.....	98
3.2.4 Chuva de projeto	99
3.2.5 Estudo de tráfego.....	101
3.3 Dimensionamento do pavimento	101
3.3.1 Dimensionamento mecânico.....	101
3.3.2 Dimensionamento hidráulico	102
3.4 Apresentação das estruturas de pavimentos permeáveis analisadas	102
3.5 Caracterização dos materiais das estruturas (E1 e E2) do pavimento.....	104
3.5.1 Camadas de base/assentamento e rejuntamento.....	104
3.5.2 Manta geotêxtil bidim	108
3.5.3 Peças de intertravado permeável	109
3.6 Execução das estruturas de pavimento (E1 e E2)	109
3.7 Manutenção das estruturas de concreto permeável.....	110
3.8 Monitoramento do lençol freático.....	110
3.9 Análise do desempenho das estruturas de pavimentos permeáveis	111

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	112
4.1	Caracterização da região de estudo	112
4.1.1	Estudo geotécnico e análise granulométrica	112
4.1.2	Determinação dos limites de liquidez e plasticidade	115
4.1.3	Caracterização do solo da camada do subleito	116
4.2	Chuva de projeto	119
4.3	Estudo de tráfego	120
4.4	Dimensionamento das estruturas do pavimento.....	121
4.4.1	Dimensionamento mecânico.....	121
4.4.2	Dimensionamento hidráulico	122
4.5	Apresentação das estruturas de pavimentos permeáveis analisadas	125
4.6	Caracterização dos materiais das estruturas (E1 e E2) do pavimento.....	126
4.6.1	Camadas de base/assentamento e rejuntamento.....	126
4.6.2	Manta geotêxtil bidim RT-16.....	130
4.6.3	Peças de intertravado permeável	130
4.7	Execução das estruturas do pavimento	136
4.8	Custos das estruturas de pavimento implantadas (E1 e E2).....	140
4.9	Manutenção.....	140
4.10	Monitoramento do lençol freático.....	142
4.11	Análise do desempenho das estruturas de pavimentos permeáveis	143
5	CONCLUSÕES	147
	REFERÊNCIAS	149

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A crescente urbanização das cidades vem gerando diversos impactos no setor de Infraestrutura urbana. Um dos efeitos mais preocupantes tem sido a diminuição da permeabilidade das superfícies que, por sua vez, contribui diretamente para o aumento do escoamento superficial das águas pluviais. De maneira geral, pode-se dizer que:

A expansão das áreas urbanas reflete-se na impermeabilização de superfícies e na alteração do ciclo hidrológico, provocando o aumento das vazões de pico e, muitas vezes, dos alagamentos. Cada nova edificação construída aumenta a vazão prévia natural, o que resulta em uma vazão maior transportada para a rede pública (SILVA; MOURA, 2017, p. 86).

Como forma de mitigar os alagamentos, em geral, são adotadas medidas estruturais de drenagem urbana, como, por exemplo, a implantação de projetos de galerias e/ou canalizações nas vias urbanas. No entanto, verifica-se que essas soluções não são sustentáveis e que o custo para implantação das mesmas é muito alto a ponto de torná-las impraticáveis. Além disso, essas práticas tem se mostrado ineficientes, pois promovem o rápido escoamento das águas pluviais, e transferem o problema da inundação urbana para a jusante (MOURA, 2005).

Segundo Araújo, Tucci e Goldenfum (1999), no intuito de promover a busca da manutenção das condições de pré-desenvolvimento, atuando na fonte da geração do mesmo, existe uma tendência moderna na área de drenagem urbana, que consiste na utilização de dispositivos de acréscimo de infiltração e do aumento de retardo do escoamento de águas pluviais.

1.2 Justificativa

Diante desse contexto, estão sendo desenvolvidos estudos que refletem uma nova abordagem para o manejo das águas pluviais, que tem resultado na adoção de medidas não estruturais e mais sustentáveis, para o controle das inundações urbanas. Segundo Schuchter Júnior e Miranda (2016), Acioli (2005), Goldenfum *et al.* (2000) e Schueler (1987) uma das técnicas para reter as águas pluviais na fonte, retardar o escoamento superficial e aumentar as taxas de infiltração no solo consiste na utilização do pavimento permeável.

Segundo Almeida (2017), o sistema de pavimentação permeável deve apresentar as mesmas camadas constituintes do pavimento convencional, entretanto, este tipo de pavimento deve ser composto por materiais com características pré-determinadas e deve ser executado de modo que possa apresentar eficiência em termos mecânicos e hidráulicos, simultaneamente.

De acordo com Marchioni e Oliveira (2010), a utilização de pavimentos permeáveis como medida de controle das cheias urbanas apresenta inúmeras vantagens, tais como: a redução da erosão, melhorias na segurança e no conforto (redução de poças de água e do ruído, respectivamente), melhoria na qualidade da água, ganhos ambientais (recarga de reservas subterrâneas), e financeiros. Entretanto, deve-se atentar para a possibilidade de poluição do lençol freático e para a colmatação (obstrução dos espaços vazios) das juntas e do próprio pavimento.

De acordo com Kim e Lee (2010), é difícil atenuar a energia sonora nas áreas urbanas. Diante deste contexto, o concreto permeável torna-se uma solução eficaz, tendo em vista que geralmente é aplicado no pavimento de concreto como uma barreira sonora, reduzindo o impacto de ruído da rodovia. Além disso, vale salientar que segundo os estudos de Macêdo *et al.* (2020), o concreto permeável com adição de Dióxido de Titânio (TiO_2) é um processo alternativo que pode auxiliar no tratamento de esgoto sanitário, devido às suas propriedades fotocatalíticas (capacidade de transformar os poluentes orgânicos tóxicos em substâncias inofensivas, através da oxidação avançada).

Os pavimentos permeáveis são considerados como uma inovação tecnológica de materiais e, portanto, contribuem para elevar o nível de sustentabilidade das construções, que vem sendo avaliado pelas Certificações (LEED, AQUA, GBG Brasil). A implantação desta solução requer um conhecimento multidisciplinar que interliga os conteúdos referentes às disciplinas de geotecnia, drenagem, pavimentação, materiais e sustentabilidade. Além disso, este tipo de pavimento contribui para o atendimento às diretrizes estabelecidas pelas Legislações Municipais das cidades, no que diz respeito aos limites de Uso e Ocupação do Solo. No caso de Recife/PE, a Lei nº 16.176/1996 - Lei do Uso e Ocupação do Solo (LUOS) apresenta uma organização do espaço urbano, através da divisão territorial do Município em zonas que deverão atender aos parâmetros urbanísticos definidos pelo Plano Diretor.

Em muitas cidades é comum que o plano diretor exija uma área mínima permeável, que muitas vezes deixa de ser utilizada e que normalmente compõe as mesmas áreas verdes. Contudo, em grandes cidades, onde toda a flora nativa já foi removida, o cumprimento deste requisito é dificultado, sendo muitas vezes negligenciado. A utilização do pavimento permeável, além de suprir essa demanda, permite a utilização do espaço fazendo com que o proprietário possa otimizar o uso da área disponível sem deixar de cumprir a legislação (EVARISTO *et al.*, 2017).

A eficiência dos pavimentos permeáveis está diretamente associada: ao conhecimento das características locais de cada região (tipo de solo, regime de precipitações, topografia, volume de tráfego, qualidade das águas de drenagem, etc); ao dimensionamento do projeto; à aplicação correta das técnicas de execução; e a realização de manutenção do pavimento, no intuito de mitigar os efeitos decorrentes do aparecimento de manifestações patológicas.

Visando atender às necessidades expostas acima, este trabalho irá realizar uma análise do desempenho de 4 (quatro) diferentes estruturas de pavimentos permeáveis implantadas em áreas amostrais no estacionamento da Escola Politécnica de Pernambuco, situada no Município do Recife - PE.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho de 4 diferentes tipos de estruturas de pavimentos permeáveis implantadas em áreas experimentais no estacionamento da Escola Politécnica de Pernambuco da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE), a fim de determinar a capacidade de infiltração dos materiais utilizados nas respectivas estruturas e, dessa forma, verificar a eficiência dos pavimentos permeáveis como técnica compensatória no controle das inundações urbanas.

1.3.2 Objetivos específicos

Visando alcançar o objetivo geral da pesquisa, alinhou-se os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar a região de estudo e os materiais utilizados na implantação de cada área experimental;

- analisar as propriedades hidráulicas, físicas e mecânicas das respectivas estruturas de pavimentos permeáveis; e
- avaliar a eficácia das técnicas de manutenção aplicadas nas estruturas revestidas com concreto permeável.

1.4 Estrutura do trabalho

O Capítulo 1 apresenta uma **Introdução** que ressalta a **Justificativa** do tema escolhido, os **Objetivos gerais e específicos** para desenvolvimento da pesquisa e a organização dos capítulos da **Estrutura do trabalho**.

O Capítulo 2 aborda o Referencial teórico, que compreende: uma abordagem sobre a evolução e os impactos da urbanização no meio urbano, ressaltando os aspectos gerais sobre o pavimento permeável, englobando as vantagens e desvantagens da implantação do mesmo, breve histórico da utilização de concreto permeável nos pavimentos, as legislações e normas vigentes, as questões de sustentabilidade associadas ao pavimento permeável, a classificação dos pavimentos permeáveis, as diretrizes para elaboração dos projetos e execução dos pavimentos permeáveis; sua conservação e manutenção, suas principais manifestações patológicas, avaliação do desempenho e dos custos envolvidos na implantação e manutenção dos mesmos.

O Capítulo 3 apresenta a **Metodologia** utilizada para a obtenção dos resultados deste trabalho, isto é, ressalta as principais características da região de Pernambuco (Estacionamento da Escola Politécnica de Pernambuco – POLI/UPE); apresenta uma revisão prisma sobre o tema; as características da área de estudo e a especificação dos materiais utilizados nas estruturas de pavimento permeável analisadas; descreve as etapas necessárias para implantação das estruturas e os procedimentos adotados para analisar o desempenho das estruturas do pavimento.

O Capítulo 4 compreende os **Resultados** da pesquisa que engloba um comparativo entre as propriedades ressaltadas pelos diversos estudos identificados pela Revisão Prisma; os ensaios realizados com os blocos pré-moldados de concreto e com os agregados empregados nas camadas constituintes do pavimento; a verificação da capacidade de permeabilidade das estruturas de pavimentos permeáveis; a análise do desempenho das estruturas, bem como as

técnicas de manutenção realizadas para recuperação da permeabilidade¹ das estruturas de concreto permeável. O Capítulo 5 aborda as **Conclusões**, ressaltando os benefícios da implantação dos pavimentos permeáveis e a importância da manutenção para a conservação das estruturas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Diante da crescente impermeabilização do solo provocada pela pavimentação das vias urbanas e pelo desenvolvimento imobiliário, a implantação do pavimento permeável surge como uma alternativa sustentável e eficaz para reduzir os impactos negativos da urbanização, pois atua diretamente no controle das enchentes.

2.1 A urbanização e os impactos no meio urbano

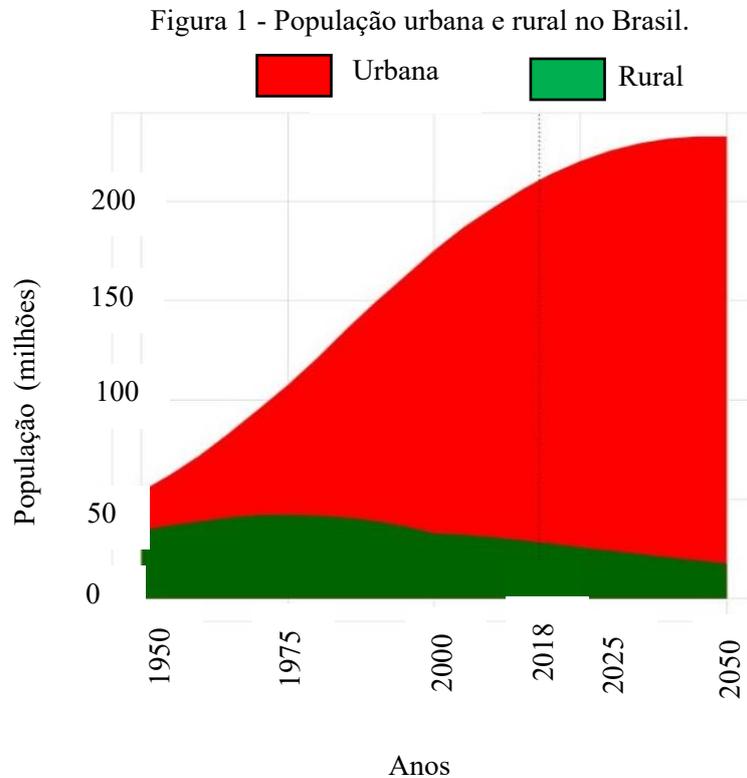
Segundo a ONU (2009), a urbanização é um processo de desenvolvimento econômico e social, resultado da transformação de uma economia rural para uma economia de serviços concentrada em áreas urbanas. Cada vez mais o processo de urbanização vem crescendo e de forma desordenada, sem o devido planejamento das infraestruturas necessárias ao desenvolvimento harmônico da cidade. Este fato provoca o surgimento de problemas de drenagem por ocasião dos eventos hidrológicos intensos.

Estima-se que até 2050 o crescimento contínuo da população e da urbanização ocasionará um acréscimo de 2,5 bilhões de pessoas à população urbana do mundo. Este fato aumentará a quantidade das áreas urbanas e das superfícies impermeáveis (ZHONG e WILLE, 2015). De acordo com o Relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) apresentado em junho de 2018, cerca de 68 % da população mundial viverá em cidades até 2050. Preparar as cidades para tal crescimento se torna mandatório para garantir a sustentabilidade e atingir metas climáticas como os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) e os preceitos estabelecidos na Nova Agenda Urbana. (SÃO PAULO, 2018).

De acordo com SÃO PAULO (2018), o Brasil já passou por uma urbanização rápida durante a segunda metade do último século e a proporção de pessoas vivendo em cidades passou de 36 % em 1950, para 87 % em 2018. A ONU projeta que em 2050 essa proporção

¹ A permeabilidade ou condutividade hidráulica corresponde a capacidade que o solo possui de permitir o escoamento da água entre os seus espaços vazios. A sua avaliação é realizada através do coeficiente de permeabilidade (K), também conhecido por taxa de infiltração. A nomenclatura dos termos varia de acordo com as diversas áreas da ciência: geotécnica, recursos hídricos, etc.

chegará a 92,4 %. Enquanto no mundo espera-se que a população rural ainda cresça por alguns anos, no Brasil há uma queda constante desde os anos 1970 (Figura 1).

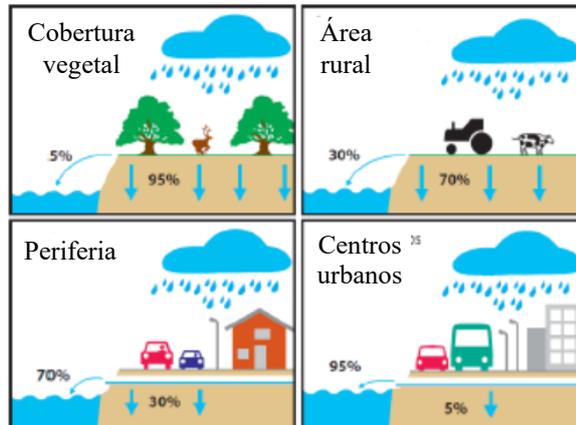


Fonte: SÃOPAULOSÃO (2018).

2.1.1 Impactos na drenagem urbana

A crescente urbanização também é notória na Região Metropolitana do Recife (RMR). Silva Junior (2015) afirma que o início da urbanização na cidade do Recife é datado do século XVI, quando sua atual área ainda pertencia à Vila de Olinda. Diversos engenhos foram instalados na planície estuarina do Rio Capibaribe, dando início aos centros de povoações. Este processo urbanístico se intensificou no início do século XX, com a modificação do espaço horizontal e vertical, acarretando transformações nos ecossistemas naturais e provocando o esgotamento das áreas permeáveis (Figura 2).

Figura 2 - A influência da urbanização na drenagem natural.



Fonte: Interpave (2010).

De acordo com Batezini (2013), o crescimento da urbanização nas cidades brasileiras tem sido acompanhado de sérios problemas de infraestrutura, como os sistemas de abastecimento de água, de coleta e tratamento de esgoto, transporte, geração de resíduos, drenagem de águas pluviais, dentre outros. Canholi (2013) afirma que a impermeabilização das superfícies pelo avanço da urbanização impede o armazenamento de água no solo e, por conseguinte dos aquíferos, diminuindo o escoamento de base dos córregos, tendo influência direta no regime de escoamento e na qualidade das águas. Essa impermeabilização contribui significativamente para o surgimento de inundações urbanas (LEGONDE *et al.*, 2020). A Figura 3 mostra um ponto de alagamento ocorrido durante as fortes chuvas do dia 13/05/2021 na Cidade do Recife/PE.

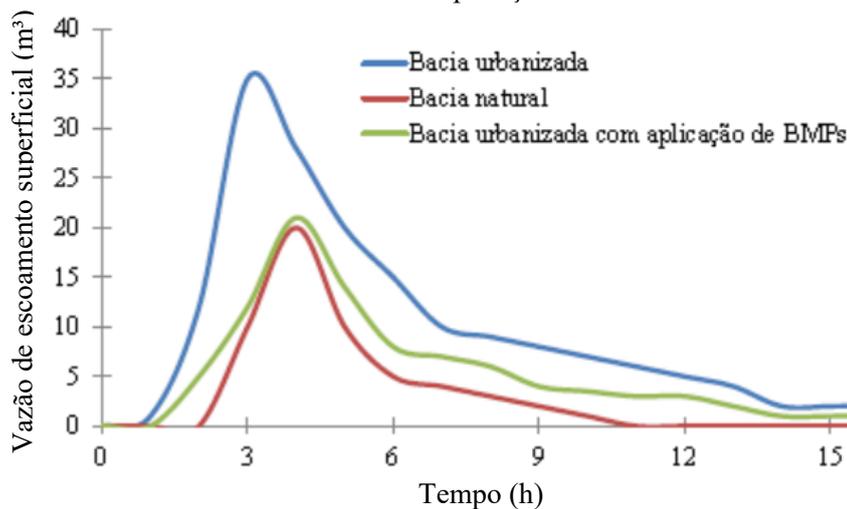
Figura 3 – Chuva do dia 13/05/2021 em Recife/PE.



Fonte: Autora (2021).

Segundo Coutinho (2011), na tentativa de se proteger contra as cheias urbanas, evitando o redimensionamento do sistema de drenagem, surge a ideia de reconstituir a vazão de preocupação, fazendo com que a água da chuva volte a ser interceptada, antes de atingir a rede de drenagem. Dessa forma, as chamadas medidas alternativas ou compensatórias de drenagem, também chamadas *Best Management Practices* (BMPs), como pavimento poroso, trincheiras de infiltração, reservatório de detenção, dentre outras, se apresentam como bons instrumentos de controle do escoamento superficial tendo como objetivo preservar as condições hidrológicas da bacia pré-urbanizada, apresentando os processos naturais para promover a drenagem e disposição das águas pluviais, reduzindo os impactos para um nível aceitável (Figura 4).

Figura 4 – Cenários de hidrogramas para bacia natural, bacia urbanizada e bacia urbanizada com aplicação de BMP.



Fonte: Coutinho (2011).

Batezini (2013) afirma que, quando corretamente projetado, o pavimento permeável influencia significativamente nas vazões de pico que ocorrem durante eventos de chuva. Logo, a utilização dos pavimentos permeáveis tende a minimizar esses problemas, já que suas camadas porosas absorvem água, funcionando, desse modo, como um reservatório para jogá-la posteriormente ao solo (Figura 5).

Figura 5 – Seção tipo genérica do pavimento permeável.



Fonte: Adaptado de HASELBACH, L. *et al.* (2017)

2.1.2 Impactos na geração de resíduos

De acordo com Vidal (2014), o crescimento da urbanização nas cidades brasileiras tem sido acompanhado de sérios problemas de infraestrutura, como os sistemas de abastecimento de água, de coleta e tratamento de esgoto, transporte, geração de resíduos, drenagem de águas pluviais, dentre outros. Vale destacar a influência do crescimento populacional no aumento proporcional da geração de resíduos sólidos que, se destinados inadequadamente, tornam-se um componente complicador ao escoamento pluvial devido a obstrução da entrada dos dutos, acabando por contribuir tanto para ampliação da poluição dos recursos hídricos como o aumento dos fenômenos de cheias urbanas (SILVA; SANTIAGO, 2007).

Segundo a ABRELPE (2011), no Brasil foram coletados cerca de 106.549 toneladas/dia de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) nos logradouros públicos. Diante da significativa disponibilidade de RCD e da existência de tecnologia de reciclagem, a utilização deste agregado reciclado em camadas de pavimentos tem-se mostrado viável. Assim, vários estudos vêm sendo desenvolvidos no Brasil e no mundo, objetivando a comprovação do uso deste como um material adequado, de baixo custo e menos impactante ao meio ambiente (FARIAS, 2013).

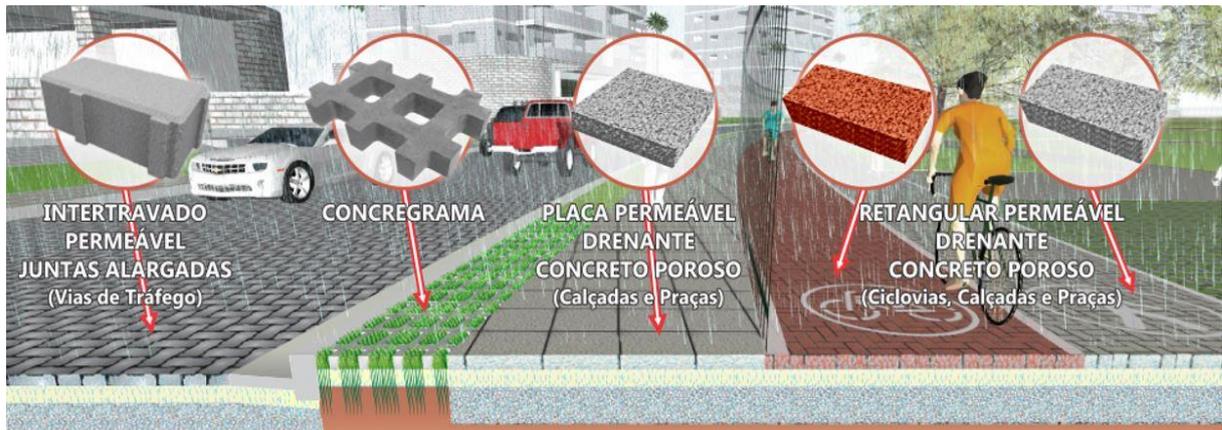
Um grupo de pesquisadores de uma universidade australiana estudou a possibilidade de uso de dois diferentes tipos de Resíduos de Construção Civil e Demolição Reciclados (RCD-R) na camada de base de pavimentos permeáveis. Os autores compararam características físicas, químicas, geotécnicas e hidráulicas de resíduos constituídos de asfalto e de concreto com um agregado graúdo natural (RAHMAN *et al.*, 2015). Além disso, os estudos de Motta (2005) e Moreira, Dias e Rezende (2007) ressaltam que as cidades de São Paulo/SP e Uberlândia/MG elaboraram especificações que passaram a incluir nos seus editais de licitação, na modalidade concorrência, a opção de utilização de materiais reciclados de RCD em camadas de pavimentos em vias locais.

A pesquisa de Almeida (2017) aponta que o emprego de sistemas de pavimentação em concreto permeável, atrelado à utilização de RCD-R, parece ser uma estratégia bastante eficaz em termos socioambientais, uma vez que não apenas permite a percolação da água através da estrutura do sistema, mas sua construção demanda menos recursos naturais que os pavimentos convencionais, e ainda proporciona o reaproveitamento de materiais descartados pela população.

2.2 Pavimento permeável

Yazaki (2013) descreve os pavimentos permeáveis como revestimentos dotados de superfície permeável que permitem a infiltração e a detenção temporária da água pluvial. Esse revestimento tem grande potencial de aplicabilidade, visto que não necessita de espaço urbano extra para seu uso, além de atender à dupla função de melhorar a qualidade da água e reduzir a quantidade do escoamento superficial. Este tipo de pavimento apresenta uma ampla versatilidade de uso (Figura 6), pois pode ser utilizado em calçadas, parques, praças, quadras poliesportivas, estacionamentos e ruas de tráfego leve (ALEGRIA, 2011).

Figura 6 - Aplicações do pavimento permeável.



Fonte: ADRIARQ (2014).

A eficácia do pavimento permeável no combate às inundações urbanas está associada ao seu desempenho ambiental, que proporciona grandes vantagens que não eram reconhecidas inicialmente.

2.2.1 Vantagens e desvantagens

Holtz *et al.* (2011) afirma que uma das maiores vantagens que o pavimento em concreto permeável possui está relacionada à sua capacidade de agir como dois elementos em um só: elemento de pavimentação e de drenagem. Em contrapartida tem-se o sistema convencional, que necessita de grandes obras de drenagem e posterior pavimentação.

De acordo com Acioli (2005) e Marchioni e Oliveira (2010), a implantação dos pavimentos permeáveis proporciona algumas vantagens, tais como:

- contribuição para a diminuição das inundações urbanas;
- realimentação do aquífero;
- redução das áreas impermeáveis, mantendo a área útil do terreno;
- melhoramento da qualidade das águas, devido à filtração das mesmas no corpo do pavimento;
- redução das ilhas de calor;
- redução ou eliminação dos custos para implantação do sistema de drenagem tradicional;

- aumento da segurança e do conforto nas vias, devido à redução de poças d'água e ruídos;
- redução da erosão do solo urbano; e
- aumento do nível de sustentabilidade das construções, pois o pavimento permeável é considerado um material reciclável que pode utilizar materiais locais e auxiliar na redução do aquecimento terrestre.

Na engenharia de transportes os revestimentos permeáveis são eficientes no controle da derrapagem, da aquaplanagem e do spray (ASCE, 1992; SCHUELER, 1987), na medida em que permitem a percolação dentro da estrutura do pavimento, eliminando a lâmina d'água sobre a camada superficial, ou seja, de revestimento.

De modo geral, pode-se dizer que os pavimentos permeáveis possuem uma elevada porosidade, boa drenabilidade e contribuem para a redução dos impactos hidrológicos da urbanização. Segundo HÖLTZ (2011), este tipo de pavimento absorve menos radiação solar e facilita a sobrevivência da arborização em áreas pavimentadas, por permitir a chegada de água e ar até as raízes. Diante das características mencionadas, pode-se dizer que o pavimento permeável é uma das melhores opções para minimizar a impermeabilização das cidades.

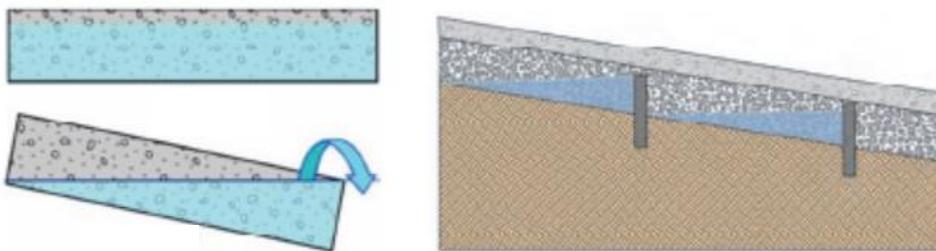
Entretanto, Acioli (2005) afirma que os pavimentos permeáveis apresentam algumas desvantagens:

- risco de contaminação do aquífero, dependendo das condições do solo e da suscetibilidade do aquífero;
- possibilidade de obstrução das camadas (colmatação) do pavimento; e
- necessidade de mão-de-obra especializada para a construção do pavimento.

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; em regiões com altas taxas de erosão devido ao acúmulo de sedimentos na superfície do pavimento, que são transportados pelos ventos; e áreas de recarga de aquíferos. Além disso, a utilização desse tipo de pavimento pode ser restrita, requerendo solos permeáveis profundos (no caso do sistema de infiltração total), tráfego leve e o uso de terras adjacentes (ACIOLI, 2005).

Os pavimentos permeáveis têm sua eficiência reduzida quando utilizados em greides inclinados. De acordo com Marchioni e Oliveira (2010) e com os requisitos da ABNT NBR 16416 (2015), quanto maior a inclinação, menor é a quantidade de água infiltrada, e maior será a parcela de run-off (coeficiente de escoamento). Portanto, sugere-se que estes pavimentos não sejam utilizados em inclinações superiores a 5%. Outra inconveniência da utilização dos pavimentos permeáveis em greides inclinados é a necessidade de colocação de um anteparo, como esquematizado na Figura 7, para permitir que a função de reservatório da base seja mantida, evitando que a água volte à superfície na parte inferior do pavimento (STORCK, 2017).

Figura 7 - Configuração do pavimento em greide inclinado, diferença do armazenamento temporário da água em greide inclinado ou plano.



Fonte: LEMING *et al.* (2007).

Também vale citar como limitações ao uso dos pavimentos permeáveis, a baixa resistência mecânica quando são severamente solicitados e a sua aceitação com relação à acessibilidade, por se tratar de superfícies geralmente rugosas, cujas juntas ou orifícios podem causar dificuldades na locomoção dos transeuntes (CASTRO, 2011). Além disso, os pavimentos permeáveis têm restrições de aplicação sobre solos expansivos e deformáveis, e necessitam de uma manutenção específica para evitar/recuperar a perda de permeabilidade (BALBO, 2020).

2.2.2 Breve histórico da utilização de concreto permeável nos pavimentos

De acordo com Francis (1965), a utilização do concreto permeável no processo de construção tem sua origem em meados do século XIX, em diversos países da Europa, seja em casas, edifícios, blocos ou até mesmo em painéis pré-fabricados. O boletim da American Concrete Institute ACI 522R (ACI, 2010), ressalta que o primeiro registro do uso de concreto

permeável ocorreu em 1852, quando o mesmo foi utilizado na construção de duas casas do Reino Unido.

O pavimento com estrutura porosa foi inicialmente aplicado na França, nos anos 1945-1950, porém sem muito êxito, pois a qualidade do betume na época (heterogêneo e de pouca trabalhabilidade) não sustentava as ligações da estrutura, devido ao excesso de vazios. Ele foi novamente utilizado somente 20 anos depois, no final dos anos 1970, quando alguns países como a França, os Estados Unidos, o Japão e a Suécia voltaram a se interessar pelo pavimento poroso (AZZOUT *et al.*, 1994). Esse interesse surgiu em função do aumento das superfícies impermeáveis, ocasionado pelo rápido crescimento populacional que, por sua vez, sobrecarregou os sistemas de drenagem existentes gerando inúmeras inundações.

Li (2009) aponta que o avanço nos estudos de concreto permeável, quanto à sua aplicação como pavimento permeável ou em peças de sistemas de drenagem, se intensificou há cerca de 20 anos, sobretudo nos Estados Unidos da América (EUA). O pavimento permeável passou a ser implantado com mais frequência em vários outros países, como Japão, Austrália, Suécia, Canadá e Portugal. A Figura 8 mostra alguns casos de implantação do pavimento permeável em diversos países.

Figura 8 - Implantação de pavimentos permeáveis: Westmoreland – EUA (A); Vancouver (Canadá) (B); Parque Duppigheim (Portugal) (C).



Fonte: Marchioni (2021); ICPI (2016); Foto Pollyanna Marsi de Lucena.

Segundo Marchioni (2016), o mercado de pavimentos permeáveis cresce em torno de 25% por ano nos Estados Unidos. E, na Alemanha (que é pioneira no uso desse tipo de pavimento), são construídos cerca de 20 milhões de m² de pavimentos permeáveis por ano em construções residenciais e comerciais.

No Brasil, os pavimentos permeáveis ainda são pouco conhecidos e difundidos, por causa de problemas relacionados ao baixo conhecimento técnico, de desempenho, da manutenção, da durabilidade e eficácia com o passar dos anos, principalmente onde podem ocorrer problemas como a colmatação por sedimentos e juntamente com a passagem de veículos, ocasionando a redução da capacidade de infiltração, aumentando o escoamento superficial (COOPER, 2013).

No que diz respeito as experiências pioneiras para implantação de pavimento permeável no Brasil, pode-se citar o pavimento em blocos de concreto no depósito de contêineres do Porto de Santos (KNAPTON E COOK, 2000), bem como a execução da calçada do Jockey Club em São Paulo em 2006 (Figura 9). A partir de então, a implantação desse sistema construtivo tem evoluído tecnicamente e vem sendo utilizado em obras de diversas outras regiões no país.

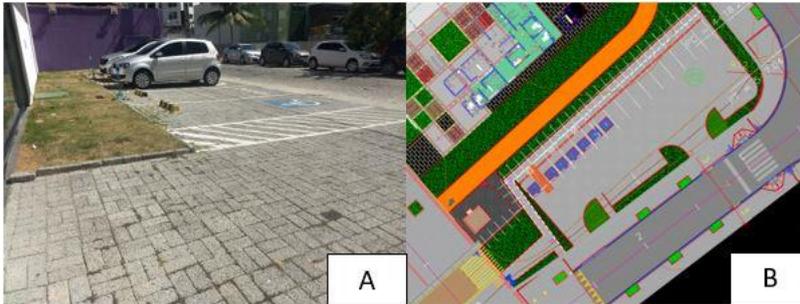
Figura 9 - Calçada do Jockey Club em São Paulo (Brasil).



Fonte: CASACOR (2015).

A Figura 10 apresenta alguns casos encontrados na Cidade de Recife/PE. Na primeira imagem (Figura 10A) observa-se que foi implantado o revestimento em intertravado permeável no estacionamento de uma unidade farmacêutica. Neste caso, vale salientar que o coeficiente de permeabilidade determinado atende aos requisitos da ABNT NBR 16416 (2015), no entanto, como não foi disponibilizada a seção transversal do pavimento, só foi possível caracterizar a camada superficial do pavimento (o revestimento) como permeável. O segundo caso, apresentado na Figura 10B, refere-se à elaboração de um projeto de estacionamento de pavimento permeável.

Figura 10 - Caso em Recife/PE: implantação de revestimento permeável (A); Elaboração de projeto de pavimento permeável (B).



Fonte: Autora (2021).

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), o revestimento permeável consiste na camada superficial do pavimento que recebe diretamente a ação de rolamento e carga de veículos, tráfego de pedestres ou cargas estáticas, e simultaneamente atende aos critérios de coeficiente de permeabilidade. Enquanto que o pavimento permeável compreende toda a estrutura do pavimento composta por revestimento, base/sub-base, que permitem a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial.

2.2.3 Normas e legislações municipais vigentes

De acordo com Costa (2019), o programa de licenças de descargas pluviais *National Pollutant Discharge Elimination System* (NPDES) dos Estados Unidos reconhece a viabilidade do uso de pavimento permeável como a Melhor Prática de Gestão – *Best Management Practice* (BMP). Os pavimentos permeáveis também são reconhecidos como um “BMP” pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), bem como por muitas agências provinciais, estaduais e locais de gestão de águas pluviais. Vale salientar que, o ACI tem um comitê específico de trabalho (*Committe 522*) sobre este tipo de pavimento e a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) atua no desenvolvimento de padrões no intuito de caracterizar as propriedades, a produção e a utilização dos pavimentos permeáveis.

Na Austrália, o concreto permeável é valorizado como um elemento essencial na *Water Sensitive Urban Design* (WSUD) para melhorar não só a qualidade, como também a quantidade de água em áreas urbanas. Alguns relatórios técnicos de procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis como os fornecidos pela *American Society of Civil Engineers* (ASCE) e pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), trazem especificações para a implementação de pavimentos permeáveis.

No que diz respeito às normas internacionais sobre concreto permeável, Lamb (2014) aponta as normas da ASTM, tais como a C1688/C1688M (ASTM, 2014) – *Standard test method for density and void content of freshly mixed pervious concrete*; a C1701/C1701M (ASTM, 2009) – *Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete*; e a C1747/C1747M (ASTM, 2013) – *Standard test method for determining potential resistance to degradation of pervious concrete by impact and abrasion*. Além dessas, existe a ACI 522R (2010) – *Report on Pervious Concrete*, elaborada pela *American Concrete Institute*.

Em 2015, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a primeira norma referente a estes tipos de pavimentos, a ABNT NBR 16416 (2015), a qual estabelece os requisitos mínimos exigíveis ao projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto, construídos com revestimentos de peças de concreto intertravadas, placas de concreto ou pavimento de concreto moldado no local (COSTA, 2019). Além disso, o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), através da norma DNER-ES 386/99, definiu a sistemática a ser empregada na execução do pré-misturado a quente com asfalto polímero, que pode ser empregado como camada sobrejacente ao revestimento, com a função de camada porosa de atrito.

No intuito de incentivar a elaboração de legislações, voltadas para a gestão da drenagem urbana dos municípios brasileiros, o Governo Federal lançou, em 2006, um Programa denominado Drenagem Urbana Sustentável, sob a gerência do Ministério das Cidades. Este programa promove políticas de desenvolvimento urbano, uso e ocupação do solo e gestão das bacias hidrográficas, através da proposição de ações estruturais e não estruturais, focando a prevenção, o controle e a minimização dos impactos decorrentes de inundações em áreas ribeirinhas e no meio urbano (BRASIL, 2006).

Tucci (2003) afirma que para implementar medidas sustentáveis na cidade é necessário desenvolver o Plano Diretor de Drenagem Urbana. Os Planos Diretores de Drenagem Urbana (PDDU) ou, mais recentemente, Planos de Manejo de Águas Pluviais (PMAP), surgem como elemento central da gestão de drenagem urbana. Esses planos estabelecem as diretrizes para a gestão das águas pluviais em uma bacia hidrográfica e visam, fundamentalmente, reduzir o volume de escoamento, velocidade, taxas, frequência e duração dos alagamentos. Estas medidas são uma tentativa de minimização dos efeitos adversos ao meio ambiente, especialmente dos aspectos quali-quantitativos dos corpos d'água receptores, com

consequente redução de perdas econômicas, melhoria das condições de saúde da população e meio ambiente da cidade (VILLANUEVA *et al.*, 2011).

De acordo com Oneda (2018), o plano diretor de drenagem urbana deve ser um documento que vai além do mapeamento de necessidades técnicas. Deve ser um elemento de gestão pública. Diante deste contexto, vale destacar o PDDU da cidade Porto Alegre (2005) e de São Paulo (2012), que incentivam os empreendedores a utilizarem pavimentos permeáveis e outras medidas de controle na fonte da drenagem urbana.

No intuito de contribuir para a melhoria da qualidade de vida dos moradores e da condição ambiental do município, foi instituído o Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais (RECIFE, 2016). Este manual prevê a adoção de providências que visam o aumento da capacidade de retenção e de infiltração da água de chuva no lote, citando o emprego de pavimentos permeáveis e de reservatórios de acumulação de água como ações que têm por finalidade a diminuição ou o retardamento dos deflúvios gerados em cada lote ou área pública, como parques, praças, estacionamentos.

No geral, observa-se que nas cidades brasileiras existe uma boa abrangência dos dispositivos legais que contemplam desde as boas práticas no uso e ocupação do solo, até a adoção de medidas mitigatórias visando o enfrentamento às mudanças climáticas. Os estudos de Silva, Silva Júnior e Santos (2018), Silva (2018) e Silva Júnior (2015) abordam diversas leis municipais sobre o manejo das águas pluviais. Cabe ressaltar os principais dispositivos legais vigentes (Quadro 1) no Brasil, que apontam as práticas sustentáveis adotadas para o manejo de águas pluviais.

Quadro 1 - Principais dispositivos legais vigentes no Brasil.

LOCAL	LEGISLAÇÃO	ASPECTO
Recife	Lei nº 16.176/1996	Estabelece a Lei de Uso e Ocupação do Solo da Cidade do Recife.
São Paulo	Lei nº 13.293/2002	Dispõe sobre a criação das “Calçadas Verdes”.
Rio de Janeiro	Decreto nº 23.940/2004	Torna obrigatório, nos casos previstos, a adoção de reservatórios que permitam o retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem.
Brasil	Lei Federal nº 11.445/2007	Ressalta a importância da detenção ou retenção de águas

		pluviais urbanas para amortecimento de vazões de cheias.
Recife	Lei nº 18.011/2014	Política de Sustentabilidade e de Enfrentamento das Mudanças Climáticas do Recife que estabelece: a implementação de medidas que evitem ou reduzam a formação das ilhas de calor provocadas pela urbanização.
Recife	Lei nº 18.112/2015	Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "Telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências.
São Paulo	Lei nº 16.642/2017	Estabelece o Código de Obras e Edificações para o Município de São Paulo.
Recife	Lei complementar nº2/2021	Institui o Plano Diretor do Município do Recife.

Fonte: Autora (2021).

Na elaboração do PDDU deve ser mantida a sua coerência com as outras normas urbanísticas do município, com os instrumentos da Política Urbana e da Política Nacional de Recursos Hídricos (PARKINSON, *et al.*, 2003). Vale salientar que o gerenciamento da drenagem urbana está intrínseco à gestão do espaço urbano, e esta se realiza por meio dos chamados Planos Diretores de Urbanização (PDU) ou de Uso e Ocupação do Solo Urbano (SILVA JUNIOR, 2015).

No Brasil, o concreto permeável é um material que vem sendo adotado por construtores para atender ao que as legislações municipais pedem em relação à infiltração e permeabilidade na pavimentação de terrenos (MAZZONETTO, 2011). De acordo com Tucci (2002), o pavimento permeável é uma das técnicas de controle na fonte do escoamento propostas pela maioria dos Planos Diretores das cidades. Porém, a sua implementação esbarra na falta de conhecimento dos profissionais e contratantes, a qual tende a ser diminuída com a continuidade dos estudos.

Segundo Villaça (2005), o plano diretor é um plano que, a partir de um diagnóstico científico da realidade física, social, econômica, política e administrativa da cidade, do município e de sua região, apresentam um conjunto de propostas para o futuro desenvolvimento socioeconômico e futura organização espacial dos usos do solo urbano, das redes de infraestrutura e de elementos fundamentais da estrutura urbana, definidas para curto, médio e longo prazos, e aprovadas por lei municipal.

De acordo com a Pesquisa de Informações Básicas Municipais (Munic) apresentada pelo IBGE (2013), 50% das cidades brasileiras já possuem Plano Diretor. No estado de Pernambuco, vale ressaltar a existência dos Planos Diretores da cidade do Recife (Lei complementar nº 2/2021) e dos municípios de Camaragibe (Lei complementar nº341/2007) e Paulista (Lei nº 4821/2018) que, por sua vez, estabelecem um zoneamento ambiental compatível com as diretrizes para ocupação do solo, garantindo a manutenção das áreas permeáveis nos municípios.

O uso e ocupação do solo da cidade do Recife é regulamentado pela Lei nº 16.176/96, que no Art. 65, estabelece o percentual mínimo da área do terreno a ser mantida em suas condições naturais (Taxa de Solo Natural – TSN), tratada com vegetação e variável por zona. No caso do bairro da Madalena, que pertence a Zona de Urbanização Preferencial (ZUP1), a Taxa de Solo Natural é de 25% (vinte e cinco por cento), admitindo-se uma parte tratada com revestimento permeável. De acordo com Silva; Silva Júnior e Santos (2018), a implantação do pavimento permeável na cidade do Recife/PE apresenta-se como uma tecnologia que atende às exigências legislativas quanto à manutenção de áreas permeáveis nos empreendimentos.

De acordo com Silva Júnior (2015), para cumprir com os objetivos de assegurar o fluxo e escoamento das águas de forma segura para a população e suas atividades, além de toda a legislação em vigência que trata da drenagem urbana na cidade do Recife, também é importante que haja a articulação entre os principais sistemas atuantes no município, permitindo uma visão integrada da drenagem urbana no contexto dos sistemas de disciplinamento e controle do uso do solo; mobilidade urbana; meio ambiente; coleta, tratamento e disposição dos esgotos; limpeza urbana; monitoramento climático; e defesa civil.

2.2.4 Aspectos de sustentabilidade associados ao pavimento permeável

De acordo com Costa (2019), os pavimentos de concreto permeável oferecem diversos benefícios quando aplicados em áreas urbanas. A sua capacidade de drenar a água da superfície do pavimento se torna abrangente em vários setores, incluindo o meio ambiente, a sociedade e a economia. Nos três aspectos de sustentabilidade, os benefícios que podem ser obtidos com o uso de pavimentos de concreto permeável são tanto imediatos, quanto a longo prazo.

➤ *Benefícios ambientais*

O baixo impacto no uso do concreto permeável é um dos maiores fatores atribuídos ao benefício ambiental do material. Tal benefício está relacionado com o controle do escoamento das águas pluviais, o restabelecimento das fontes de água subterrânea e a redução da poluição da água e do solo (TENNIS, 2004). Segundo Henderson (2012), a capacidade de drenagem do pavimento de concreto permeável acarreta em um efeito mínimo ou nulo sobre o ciclo natural da água na área. Dessa forma, a aplicação desse material nos projetos de pavimentação é considerado “de baixo impacto ambiental” (LID - *Low Impact Development*).

O Plano Diretor de gerenciamento de fluxo (*Wet Weather Flow Management Master Plan*) da cidade de Toronto no Canadá, em 2003, incluiu o pavimento poroso como método de controle de fontes para gerenciamento de águas pluviais e, ainda, como um sistema de transporte. O pavimento de concreto permeável vem, portanto, crescendo como referência em vários países como uma alternativa para gestão de águas pluviais (COSTA, 2019).

➤ *Benefícios sociais*

Dentre estes benefícios, destacam-se a diminuição do efeito de ilha de calor e do ruído acústico das vias, proporcionando um aumento da qualidade de vida da comunidade (“YANG”; “JIANG”, 2003; LORENZI *et al.*, 2015). Além disso, a drenagem da água da chuva através do pavimento de concreto permeável traz, também, um benefício social facilmente reconhecível pelos usuários. O movimento imediato das águas entre os poros faz com que a superfície do pavimento fique livre do acúmulo de água, facilitando a segurança na mobilidade de pessoas e de veículos, e aumentando a resistência ao deslizamento dos pneus nas estradas e dos pedestres nas passarelas (COSTA, 2019).

➤ *Benefícios econômicos*

De acordo com Henderson (2012), o pavimento de concreto permeável tem o potencial de apresentar baixo custo em seu ciclo de vida, da mesma forma que um pavimento de concreto tradicional. Este custo no ciclo de vida para pavimentos de concreto tradicional é geralmente baixo pois o concreto apresenta maior vida útil que outros pavimentos, além de requerer menor manutenção durante seu tempo de uso. Entretanto não há estudos que discutam

particularmente os benefícios em relação ao custo do concreto permeável, e alguns desses estudos acabam sendo aplicáveis para condições locais (CHANDRAPPA; BILIGIRI, 2016). Portanto, o custo deste material é relativo e depende não só da infraestrutura local disponível para execução e manutenção, como também de mão-de-obra especializada.

➤ *Certificações*

Botteon (2017) afirma que nos últimos anos o concreto permeável tem sido considerado uma solução ecologicamente correta e sustentável, e vem ganhando destaque e relevância na indústria da construção civil, sobretudo por ser reconhecido pelo Conselho de Construções Ecológicas dos EUA (*United States Green Building Council - USGBC*), que define o sistema *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)* de classificação de construções sustentáveis.

O fato de os pavimentos permeáveis terem sido classificados como *Best Management Practice* pela EPA, reforçou ainda mais a contribuição dos mesmos para a conquista de certificações, que buscam avaliar o nível de sustentabilidade das construções. No Brasil, dentre as certificações mais reconhecidas estão: a Alta Qualidade Ambiental (AQUA) foi criada em 2008, pela Fundação Vanzolini; e o Referencial GBC Brasil Casa que consiste numa certificação para casas sustentáveis.

De acordo com Ecoeficientes (2021), para incentivar os cidadãos a implantarem medidas sustentáveis, cerca de 55 cidades brasileiras já adotaram o IPTU Verde, onde é possível obter desconto para o contribuinte que construir ou reformar a sua casa/empresa implantando: captação e reúso da água, geração de energia, tratamento de resíduos, aproveitamento bioclimático e uso de materiais provenientes de fontes naturais renováveis ou recicladas. Como exemplo, tem-se a cidade de São Paulo e o estado da Bahia que oferecem descontos de até 12% e 10%, respectivamente. Vale ressaltar que o município de Camaragibe (Recife/PE) instituiu o IPTU Verde através da Lei nº 0743/2017, com o objetivo de fomentar medidas que preservem, protejam e recuperem o meio ambiente, ofertando, em contrapartida, benefícios tributários aos contribuintes.

2.2.5 Classificação dos pavimentos permeáveis

Conforme Dellate e Clearly (2006), existem 03 (três) tipos de concretos permeáveis que conseguem ser representados pelo grau de resistência e drenabilidade, são eles: o hidráulico, o normal e o estrutural. O primeiro é composto por materiais com baixa resistência mecânica e uma grande permeabilidade, sendo empregado em locais não estruturais. O segundo, obtém resistência e permeabilidade intermediárias, e é comumente empregado em estacionamentos e calçadas, sendo constituído por uma mistura sem agregado miúdo. Enquanto que o concreto permeável estrutural, possui uma maior resistência mecânica, baixa permeabilidade, e devido a diminuição da quantidade de vazios, pelo fato de conter materiais de granulometria reduzida na composição, ele é empregado em ruas, avenidas e estacionamentos.

Diante dessas características apresentadas, os pavimentos permeáveis podem ser classificados de acordo com: a função compensatória em drenagem pluvial, o sistema de infiltração, o tipo de revestimento e o tipo de tráfego.

2.2.5.1 Quanto à função compensatória em drenagem pluvial

Barraud, Nascimento e Baptista (2005) afirmam que a simples adoção de pavimentos com superfície permeável ou semi-permeável, por si só, não representa um ganho significativo para os sistemas de drenagem. Sua combinação com a adoção de uma estrutura de pavimento porosa, permitindo a reservação temporária das águas pluviais em seu interior, com possibilidades de infiltração, podem melhorar significativamente o controle da produção de escoamentos em zona urbana. Dessa forma, os pavimentos podem ser classificados de acordo com as suas funções compensatórias em drenagem pluvial (Quadro 2).

Quadro 2 – Classificação dos pavimentos com funções compensatórias em drenagem pluvial.

TIPOS DE PAVIMENTO	CARACTERÍSTICAS
Com revestimentos permeáveis	Possibilitam o acesso das águas pluviais às camadas inferiores do pavimento e efetuam uma ligeira redução do escoamento superficial.
Porosos de detenção	Desempenham o papel de reservatório temporário das águas pluviais, ou seja, com evacuação localizada, sem funções de infiltração.

Porosos de infiltração	Desempenham 2 papéis distintos: a reservação temporária e a infiltração das águas pluviais.
------------------------	---

Fonte: Adaptado de Barraud (2005).

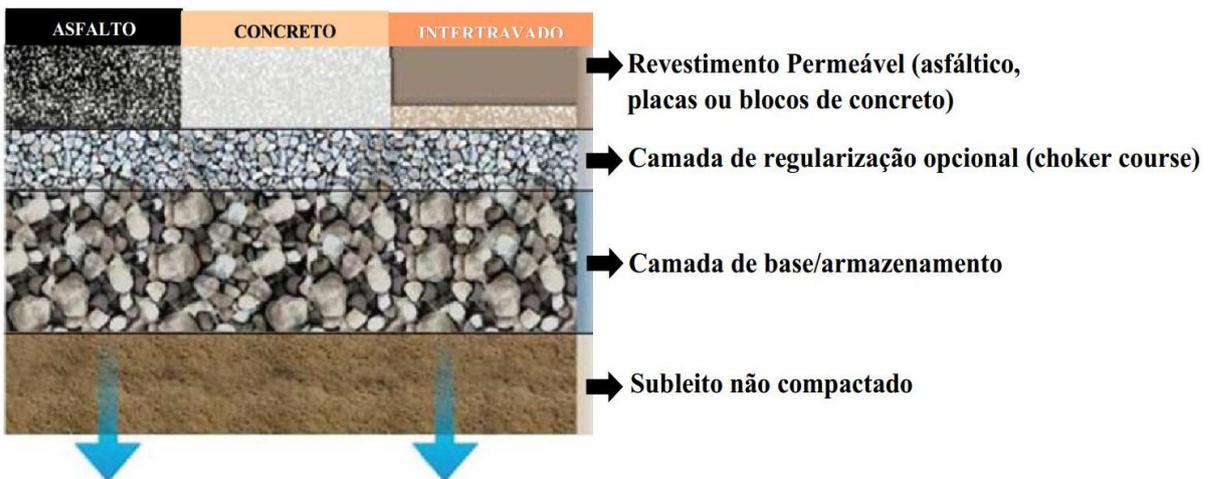
2.2.5.2 Quanto ao sistema de infiltração

De acordo com as diretrizes da ABNT NBR 16416 (2015), existem três sistemas de infiltração para os pavimentos permeáveis com classificações diferentes.

- Infiltração Total: neste sistema toda a água precipitada alcança o subleito e se infiltra.

Figura 11+

Figura 11 - Sistemas de Infiltração Total.

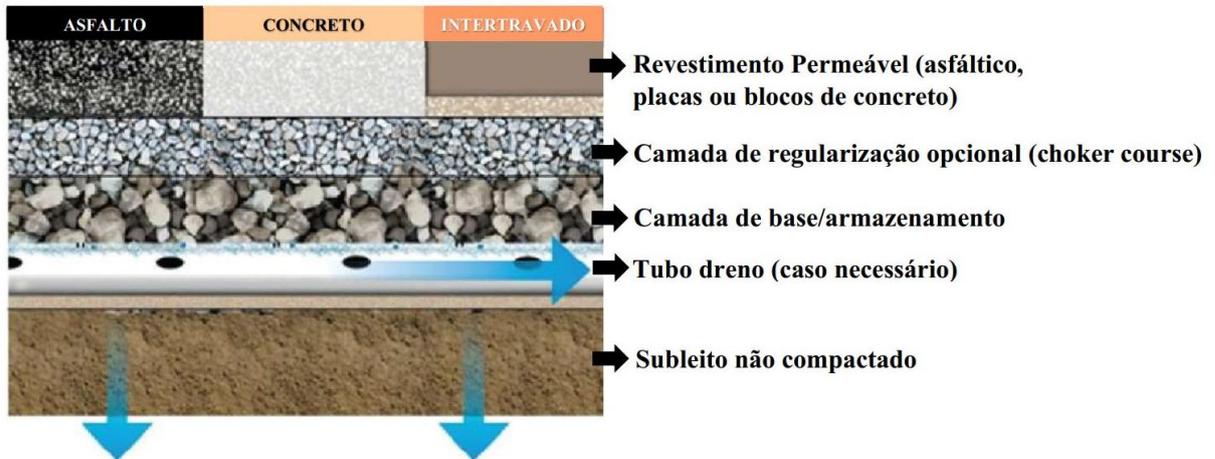


Fonte: Adaptado de HASELBACH, L. *et al.* (2017).

Nesse sistema de infiltração total, Schueler (1987) afirma que a camada granular de reservatório deve ser dimensionada suficientemente para absorver boa parte do volume total da chuva de projeto, com exceção do volume de água que infiltra durante a intempérie.

- Infiltração Parcial: neste caso, parte da água precipitada segue para o subleito e se infiltra, e o restante da água fica temporariamente armazenada na estrutura permeável, sendo depois removida pelo dreno (Figura 12).

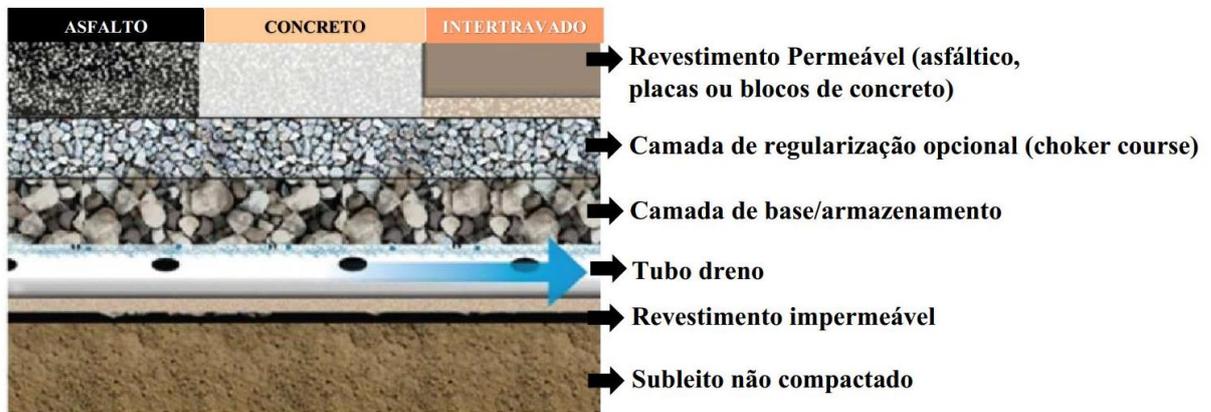
Figura 12 - Sistema de Infiltração Parcial.



Fonte: Adaptado de HASELBACH, L. *et al.* (2017).

- Sem Infiltração: neste sistema a água precipitada fica temporariamente armazenada na estrutura permeável e não infiltra no subleito, sendo posteriormente removida pelo dreno (Figura 13).

Figura 13 - Sistema sem Infiltração.



Fonte: Adaptado de HASELBACH, L. *et al.* (2017).

A ABNT NBR 16416 (2015) especifica que seja considerada a condição de saturação do solo, tanto no sistema de infiltração parcial quanto no total. Além disso, caso ocorra risco de contaminação do lençol freático, recomenda-se a utilização do sistema sem infiltração no projeto do pavimento permeável.

Segundo Ballard *et al.* (2015) e Interpave (2010), o sistema sem infiltração é recomendado nos seguintes casos: em solos pouco permeáveis ou de baixa resistência; para aproveitamento

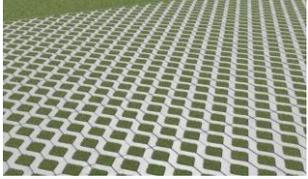
da água da chuva para fins não potáveis; para proteção da água subterrânea; quando o nível do lençol freático for alto; em áreas contaminadas; e em locais onde os riscos de contaminação do solo e da água subterrânea devem ser mitigados.

2.2.5.3 Quanto ao tipo de revestimento

Entende-se por revestimento permeável aquele cujo material de fabricação não é necessariamente poroso, mas que possibilita a penetração da água entre ele. Já o revestimento poroso é aquele que permite à água penetrar por entre seus poros (BUTLER, 2004).

A norma brasileira ABNT NBR 16416 (2015) estabelece os tipos de pavimentos permeáveis de acordo com os materiais constituintes das camadas de revestimento. Dessa forma, a Figura 14 apresenta os pavimentos permeáveis de concreto, que podem ser compostos por diversos tipos de revestimentos.

Figura 14 - Tipos de revestimentos dos pavimentos permeáveis de concreto.

TIPOS DE REVESTIMENTO	DETALHES
<p>Peças de concreto com juntas alargadas: é composto por blocos de concreto convencional, cujas juntas são preenchidas por material granular drenante.</p>	
<p>Peças de concreto com áreas vazadas: a percolação da água ocorre pelas áreas vazadas das peças que são preenchidas por gramas ou brita.</p>	
<p>Peças de concreto permeável: é constituído por blocos de concreto permeável, cujas juntas são preenchidas por material granular drenante.</p>	
<p>Placas de concreto permeável: é composto por placas permeáveis, cujas juntas são preenchidas por material granular drenante.</p>	

<p>Pavimento de concreto permeável: é produzido a partir da redução dos agregados miúdos da mistura para obtenção de uma estrutura interligada de vazios.</p>	
--	--

Fonte: Autora adaptado de Eisenberg *et al.* (2013); Piso Grama Bertioiga (2016); Glasser (2017); Braston (2020); Neves (2015);

Além dos revestimentos apresentados pela norma brasileira, existem outros tipos (Figura 15), como o truegridpaver e o concreto asfáltico CPA (Camada Porosa de Atrito).

Figura 15 - Tipos de revestimentos dos pavimentos permeáveis de concreto não citados na ABNT NBR 16416 (2015).

TIPOS DE REVESTIMENTO	DETALHES
<p>Truegridpaver: este pavimento é composto por peças modulares preenchidas por brita ou grama, que permitem a infiltração através da superfície.</p>	
<p>Concreto asfáltico CPA (Camada Porosa de Atrito): é similar ao asfalto convencional, cujos finos foram removidos para criar um maior volume de vazios na massa asfáltica. Aditivos e aglutinantes são utilizados para promover mais durabilidade e prevenir o escoamento.</p>	

'Fonte: Autora adaptado de: Eisenberg *et al.* (2013); Truegridpaver (2021) e COPAVEL (2019).

O truegridpaver é projetado para carga e tráfego moderado de veículos, bem como para pedestres e bicicletas. Este material tem super resistência à compressão e flexibilidade, é um produto adequado para estacionamentos, calçadas e diversas outras aplicações de pavimentação (TRUEGRIDPAVER, 2021).

O concreto asfáltico poroso é uma mistura entre ligante betuminoso e agregados de diâmetros uniformes, e consiste numa variação do concreto asfáltico convencional, porém é susceptível ao entupimento dos poros por meio do próprio ligante. Quando o ligante é muito fluido,

ou quando a união entre ligante e agregado é fraca, pode ocorrer a colmatção da superfície do revestimento (VIRGILIIS, 2009).

De acordo com COPAVEL (2019), o concreto asfáltico foi implantado para restaurar o pavimento da pista principal de pousos e decolagens do Aeroporto Santos Dumont/RJ. Essa mistura especial é produzida com cimento asfáltico modificado por polímero, e resulta em uma mistura mais permeável que drena a água da superfície da pista, oferecendo maior segurança e aderência às aeronaves durante pousos e decolagens, já que ele consegue aumentar a aderência dos pneus, reduzir os riscos de aquaplanagem e distância de frenagem e possibilita uma melhor visibilidade noturna dos sinais verticais, bem como uma menor reflexão luminosa dos faróis durante as chuvas. Este revestimento também foi implantado nas rodovias dos Imigrantes e Presidente Dutra (SP), e funciona com um sistema de drenagem que permite captar água da chuva e armazená-la em galerias pluviais (RENTAL, 2021).

2.2.5.4 Quanto ao tipo de tráfego

Segundo Senço (1997), a classificação do pavimento quanto ao tipo de tráfego, isto é, segundo a natureza estrutural, leva em conta o número de veículos comerciais por dia:

- *pavimento de tráfego muito leve*: passagem de até 3 veículos comerciais por dia;
- *pavimento de tráfego leve*: passagem de até 50 veículos comerciais por dia;
- *pavimento de tráfego médio*: passagem de 51 a 400 veículos comerciais por dia;
- *pavimento de tráfego pesado*: passagem de 401 a 2000 veículos comerciais por dia; e
- *pavimento de tráfego muito pesado*: passagem acima de 2001 veículos comerciais por dia.

Entretanto, vale salientar que a ABNT NBR 16416 (2015) considera como tráfego leve, a solicitação do pavimento ao tráfego preferencial de veículos leves, como ciclomotor, motoneta, motocicleta, triciclo, quadriciclo, automóvel, utilitário, caminhonete e camioneta, com Volume Diário Médio (VDM) de até 400, podendo existir ocasionalmente o tráfego de ônibus e caminhões em número não superior a um VDM de 20.

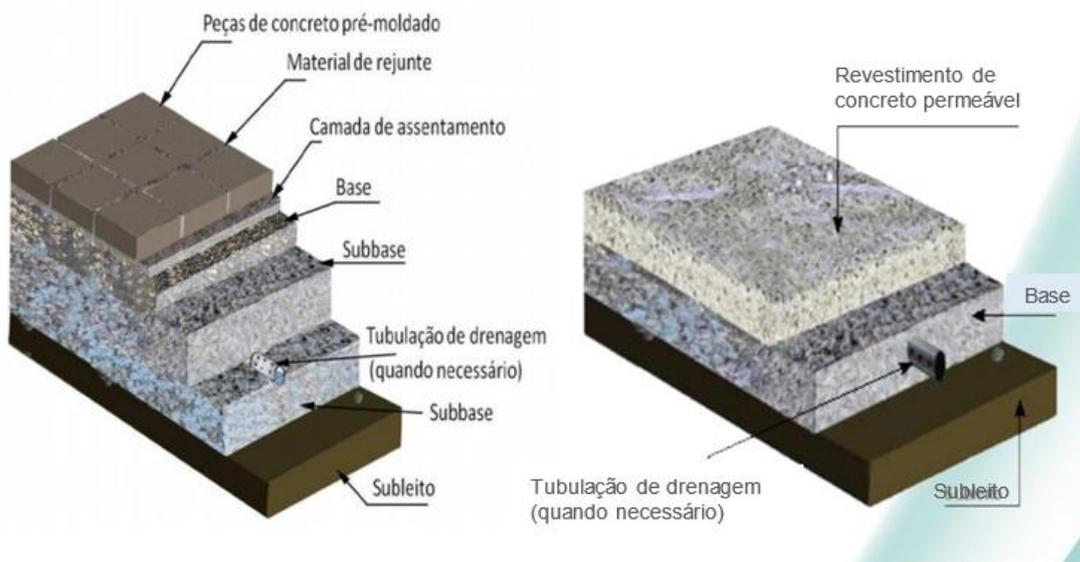
2.2.6 Estruturas dos pavimentos permeáveis

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), a estrutura do pavimento permeável corresponde à combinação das camadas de sub-base permeável (quando necessária), base permeável, camada de assentamento permeável (quando for o caso) e revestimento permeável, dimensionada para suportar o carregamento do tráfego, distribuir os esforços no subleito e permitir a percolação de água.

2.2.6.1 Tipos de estruturas

A Figura 16 apresenta as estruturas dos pavimentos constituídos por revestimentos em peças e/ou placas de concreto e em concreto permeável, nas imagens do lado esquerdo e direito, respectivamente.

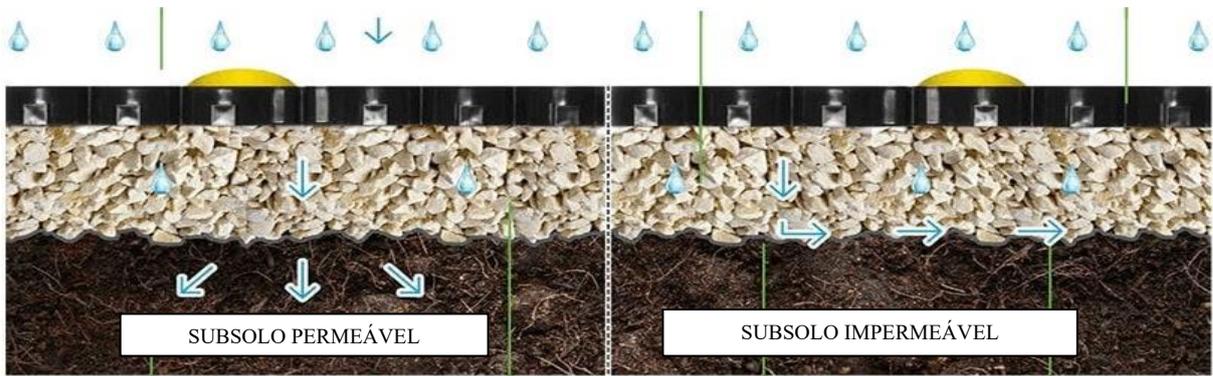
Figura 16 - Estruturas dos pavimentos permeáveis com revestimento em peças/placas de concreto e concreto permeável.



Fonte: Marchioni e Oliveira (2016).

Cabe salientar que a utilização ou não de drenos (tubulação de drenagem) será definida de acordo com o tipo de sistema de infiltração especificado pelo projeto. Com relação aos pavimentos truegridpaver, os mesmos apresentam uma estrutura similar, sendo diferenciada pelo revestimento Figura 17.

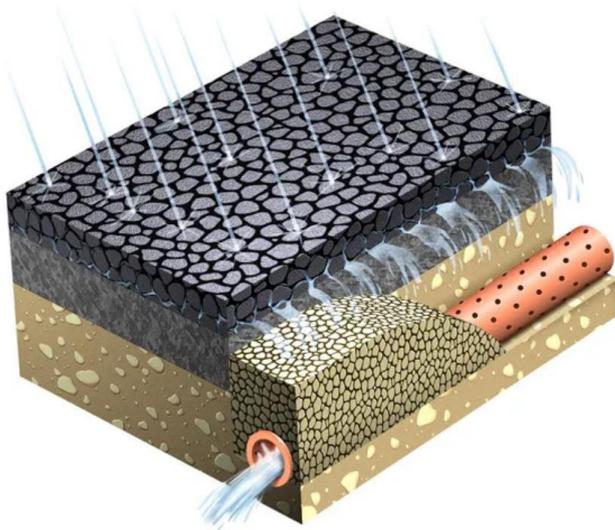
Figura 17 - Estrutura do pavimento truegridpaver.



Fonte: Truegridpaver (2021).

A Figura 18 apresenta a estrutura do pavimento com Camada Porosa de Atrito (CPA), que é formado, normalmente, por duas camadas, a superficial com concreto asfáltico drenante e a mais profunda, composta por misturas asfálticas densas convencionais, que é impermeável, apresentando função estrutural. Dessa forma, a água, ao passar pela primeira camada, é escoada pelo declive da segunda camada até os dispositivos de drenagem externos, reduzindo a possibilidade de formação de lâmina d'água (DIAS; LEÃO, 2014).

Figura 18 - Estrutura do pavimento CPA.



Fonte: Inova civil (2019).

2.2.6.2 Caracterização dos materiais constituintes das camadas

De acordo com as especificações da ABNT NBR 16416 (2015), o Quadro 3 apresenta a composição dos materiais constituintes das camadas de pavimentos permeáveis.

Quadro 3 - Materiais constituintes das camadas de pavimentos permeáveis.

MATERIAL	DESCRIÇÃO
Revestimento permeável	Camada que recebe diretamente a ação de rolamento e carga de veículos, tráfego de pedestres ou cargas estáticas, e simultaneamente atende aos critérios de coeficiente de permeabilidade.
Base permeável	Camada constituída de materiais de granulometria aberta, destinada a resistir e distribuir os esforços aos quais o pavimento estará submetido, que permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, e sobre a qual se constrói um revestimento permeável.
Sub-base permeável	Camada constituída de materiais de granulometria aberta, utilizada como reforço do subleito ou camada complementar à base.
Subleito	Terreno de fundação do pavimento.
Manta geotêxtil	Manta de material não tecido, com filamentos que permitem a passagem do fluxo de água e evitam a migração de partículas sólidas entre as camadas do pavimento.
Manta impermeável	Material impermeável utilizado para reter toda a água que percolou pela estrutura do pavimento e proteger o subleito.
Dreno	Conduto aberto (canal) ou fechado (tubo perfurado ou permeável), usado para coletar e conduzir, por gravidade, a água a ser drenada.

Fonte: Autora (2021).

No intuito de caracterizar o solo da região de estudo, e conseqüentemente definir o tipo de sistema de infiltração do pavimento, a ABNT NBR 16416 (2015) solicita que seja realizado o ensaio do coeficiente de permeabilidade do subleito, conforme o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 13292 (2021) ou ABNT NBR 14545 (2000), dependendo do tipo de solo.

A Tabela 1 apresenta o grau de permeabilidade do solo, conforme os valores dos coeficientes de permeabilidade determinados.

Tabela 1 – Grau de Permeabilidade do solo, conforme os coeficientes de permeabilidade.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DO SOLO (K)		GRAU DE PERMEABILIDADE DO SOLO
m/s	mm/h	
$>10^{-3}$	> 3600	Alta
10^{-3} a 10^{-5}	3600 a > 36	Média
10^{-5} a 10^{-7}	36 a $> 0,36$	Baixa
10^{-7} a 10^{-9}	$0,36$ a $0,0036$	Muito baixa

$< 10^{-9}$	$< 0,0036$	Praticamente impermeável
-------------	------------	--------------------------

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

De acordo com Caputo (1988), a permeabilidade, também conhecida por condutividade hidráulica, é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água entre os seus espaços vazios. A sua avaliação é realizada através do coeficiente de permeabilidade, um índice que representa a velocidade com que a água atravessa o solo.

O coeficiente de permeabilidade está fundamentado na Lei experimental de Darcy, onde a velocidade de percolação é diretamente proporcional ao gradiente hidráulico. (FERNANDES, 2017). Cabe ressaltar, que alguns estudos baseiam-se na taxa de infiltração do solo, que é determinada através do ensaio com o infiltrômetro de anel simples (Figura 19).

Figura 19 – Determinação da taxa de infiltração com infiltrômetro de anel simples.



Fonte: Sousa (2019).

De acordo com a EPA (1999), recomenda-se que para a utilização dos pavimentos permeáveis, a taxa de infiltração mínima do solo saturado seja 13 mm/h. Além disso, a pesquisa realizada por Almeida (2017) apresenta um quadro dos ensaios a serem realizados na camada do subleito de acordo com diferentes referências normativas: ABNT NBR 16416 (2015), ACI 522 R (2010), ACI 330 R (2008), ACI 522.1 (2013) e NRMCA (2011).

Com relação aos materiais empregados nas camadas dos pavimentos permeáveis, os mesmos devem atender aos parâmetros da ABNT NBR 16416 (2015), especificados na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 - Especificação para os materiais das camadas do pavimento.

PROPRIEDADE	MÉTODO ABNT	ESPECIFICAÇÃO DOS MATERIAIS		
		sub-base e/ou base	assentamento	rejuntamento
Abrasão “Los Angeles”	NBR 16974 (2001)	< 40 %	< 40 %	< 40 %
Índice de vazios	NBR 16972 (2021)	≥ 32 %	≥ 32 %	≥ 32 %
Índice de Suporte Califórnia (CBR)	NBR 9895 (2017)	≥ 80 %	-	-
Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075 mm	NBR 16973 (2021)	≤ 2 %	9,5 mm	≤ 2 %
Dimensão máxima característica (D _{máx})	NBR 7212 (2021)	-	9,5mm	≤ 1/3 da menor largura da junta ou da área vazada

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

Tabela 3 - Distribuição granulométrica recomendada para os materiais das camadas do pavimento.

PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA	PORCENTAGEM RETIDA, EM MASSA %			
	SUB-BASE	BASE	ASSENTAMENTO	REJUNTAMENTO
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	0	0
9,5mm	-	-	0 a 15	0 a 15
4,75 mm	-	90 a 100	70 a 90	70 a 90
2,36 mm	-	95 a 100	90 a 100	90 a 100

1,16 mm	-	-	95 a 100	95 a 100
0,075 mm	-	-		

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

De acordo com Acioli (2005), os materiais utilizados na camada de base/sub-base devem transmitir as solicitações aplicadas na camada superior para o solo suporte, e também deverão armazenar a água da chuva, até a sua infiltração ou drenagem pela rede lateral. A escolha destes materiais deve considerar a compatibilidade dos mesmos com a camada superficial, do tipo de tráfego, dos aspectos construtivos, da porosidade e do custo. O material mais utilizado para essa camada do pavimento é a brita, com diâmetro maior que 10 mm. Oliveira (2012) afirma que, com relação a camada de assentamento, um aspecto de grande importância é que o agregado tenha dimensão suficiente para garantir uma superfície uniforme para o assentamento das peças pré-moldadas de concreto, mas que também ocorra um travamento com a camada de base. Para que isso ocorra, os agregados da camada de base e da camada de assentamento devem atender ao seguinte critério:

- $D_{15} \text{ base}/D_{15} \text{ assentamento} < 5$ e $D_{50} \text{ base}/D_{50} \text{ assentamento} > 2$. (Onde: D_x = dimensão onde x % dos agregados é mais fino).

Segundo Cooper (2013), a escolha do tipo de material empregado em cada camada da estrutura do pavimento permeável deve ser feita levando em consideração os aspectos técnicos e econômicos, que resultarão na menor altura do reservatório e também ao esforço mecânico ao qual o pavimento será submetido, no caso de tráfego intenso.

2.2.6.3 Avaliação das estruturas de pavimentos permeáveis

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), as estruturas de pavimentos permeáveis devem ser avaliadas quanto à sua permeabilidade, através do coeficiente de permeabilidade, que é determinado conforme o procedimento descrito pela própria norma.

O estudo de Castro (2011) avaliou a capacidade de carga dos pavimentos permeáveis, por meio do ensaio de prova de carga estática (Hk wt c"42+. "tgcrl cf q"pcu"uwr gtlfeku" f qu"r cxko gpvqu com revestimentos de blocos de concreto"o cek"q"kr q"ör cxgtö. 'r ræc" f g"eqpetgvq" r gto g" xgn" g" bloco de concreto vazado tipo"öeqpetgi tco cö0Rctc"vcpvq. "cf qvw"q"r tqegf ko gpvq"guxcdgrgek do pela norma 055-ME (DNIT, 4226+ "eqpukf gtcpf q"wo c'ecti c"gs wxcrgpv" c": 422"Mi 0'

Figura 20 – Prova de carga estática.



Fonte: Castro (2011).

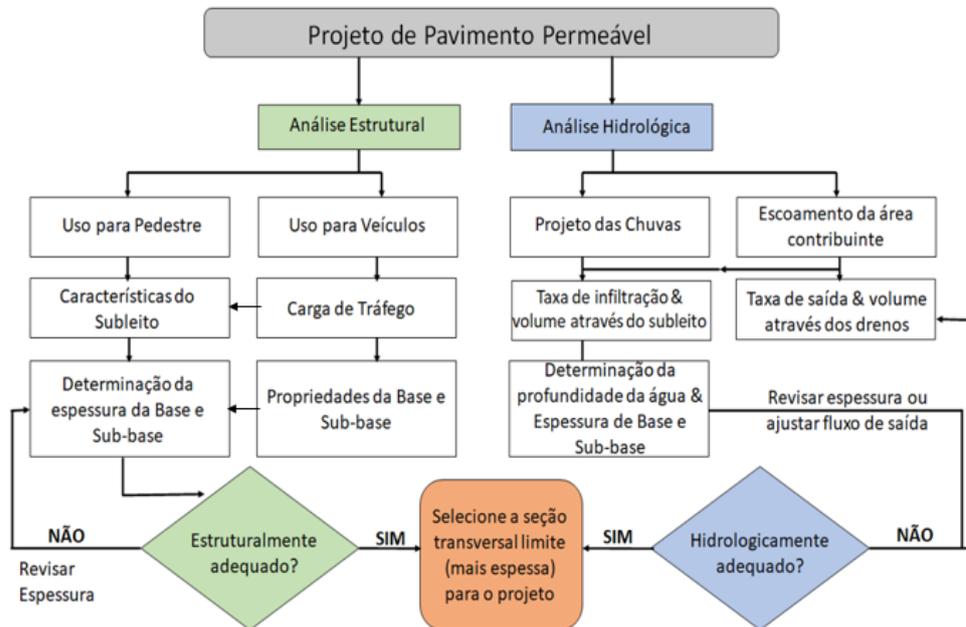
Os resultados mostraram que o revestimento de concregrama² mostrou-se mais resistente em comparação aos demais tipos de revestimentos, e apresentou comportamento similar aos pavimentos convencionais de rodagem de veículos. Enquanto que a placa de concreto permeável e o bloco de concreto maciço apresentaram deslocamentos irreversíveis, trincas e rachaduras, após a execução do ensaio de prova de carga estática (CASTRO, 2011).

2.2.7 Diretrizes para elaboração dos projetos e execução dos pavimentos permeáveis

De acordo com Costa (2019), os pavimentos permeáveis, por servirem como um meio de gestão de águas pluviais e uma superfície de apoio de cargas, devem ser dimensionados para tal. Assim, quando projetado um sistema de pavimento permeável, ambos requisitos estruturais e hidrológicos devem ser considerados. Conforme ASCE (2013), a espessura do pavimento permeável e da camada de reservatório de água deve ser dimensionada para suportar cargas estruturais, solos saturados, e para temporariamente armazenar o volume de água das chuvas. Cada componente deve ser especificado em relação ao tipo de pavimento, uso, região, condições do local, e objetivos do uso do pavimento. Não há uma única especificação que contemple todas as propostas. A Figura 21 apresenta um fluxograma da análise do processo do projeto estrutural e hidrológico.

² De acordo com Decorfácil (2021), o concregrama é definido como uma estrutura vazada de concreto que permite o plantio de diferentes tipos de grama. Em Pernambuco, este elemento arquitetônico é comumente chamado de cobograma.

Figura 21 – Fluxograma de decisão da análise estrutural e hidrológica de pavimento permeável.



Fonte: Costa (2019) adaptado de ASCE (2013).

2.2.7.1 Requisitos gerais de projeto

A ABNT NBR 16416 (2015) considera que os locais revestidos com pavimentos permeáveis devem permitir a percolação de 100 % de água precipitada incidente sobre esta área, bem como 100 % da precipitação incidente sobre as áreas de contribuição consideradas no projeto, desde que cumpridas as especificações normativas. As áreas pavimentadas permeáveis devem ter toda a sua superfície (área permeável + área de contribuição) considerada como 100 % permeável.

Marchioni e Silva (2016) estabelecem que o projeto de um pavimento permeável deve considerar os seguintes parâmetros: área da bacia de contribuição a ser controlada, capacidade de infiltração do solo, nível do lençol freático, risco de contaminação de aquífero, fragilidade do solo à ação da água, permeabilidade do subsolo nos dispositivos de infiltração, declividade do terreno, ausência de local de destino para a descarga do volume regularizado de água, disponibilidade de área, presença de instalações subterrâneas, afluência poluída, afluência com alta taxa de sedimentos e lixo, esforços e tráfego intensos, flexibilidade de desenho, e os limites de altura ou profundidade da medida de controle.

Vale salientar que a parte inferior da base do pavimento deve estar no mínimo a 0,60 m de distância do nível mais alto do lençol freático. Além disso, as estruturas de pavimento implantadas devem manter uma distância mínima de 30 m de fontes de captação de água subterrâneas e apresentar uma declividade máxima de 5 % para as áreas permeáveis (ABNT NBR 16416, 2015).

Acioli (2005) aconselha ainda um reconhecimento das estruturas de engenharia próximas ao local de implantação do pavimento, detectando-se a presença de fundações, as quais podem ser prejudicadas em função do aumento da umidade do solo subjacente. Também é aconselhável o levantamento de toda a rede elétrica, de água ou esgoto, com sua localização e profundidade, a fim de facilitar possíveis ligações com a rede de drenagem, e também evitar operações que venham comprometer o funcionamento da rede na etapa de terraplenagem.

De maneira geral, a ABNT NBR 16416 (2015) afirma que o projeto deverá considerar o tipo de uso e o local de implantação, e garantir que a definição dos materiais e espessuras das camadas a serem executadas atendam simultaneamente aos dimensionamentos mecânico e hidráulico.

2.2.7.2 Dimensionamento

Segundo Franco e Maruyama (2016), é preciso executar o dimensionamento mecânico e o hidráulico. O mecânico verifica e avalia a carga à qual o sistema será submetido. Enquanto que o hidráulico mensura o volume de água a ser recebido, definindo os níveis de infiltração.

➤ Dimensionamento mecânico

A ABNT NBR 16416 (2015) especifica que para o dimensionamento mecânico devem ser utilizados métodos reconhecidos e apropriados a cada tipo de revestimento. De acordo com Delatte (2007), os pavimentos de concreto permeável podem ser projetados/dimensionados usando qualquer norma de procedimento para pavimento de concreto (por exemplo, *American Association of State Highway and Transportation Officials, Portland Cement Association, StreetPave*). Enquanto que os pavimentos constituídos por blocos intertravados de concreto podem ser dimensionados com base nas metodologias prescritas na Instrução de Projeto do município de São Paulo (IP-06/2004).

➤ Dimensionamento Hidráulico

Quanto ao dimensionamento da camada de base, para a NRMCA (2011) a espessura hidráulica mínima a ser adotada é de 15 cm. A ABNT NBR 16416 (2015) determina que o cálculo de dimensionamento hidráulico da base pode ser desenvolvido com base na metodologia abordada na própria norma. Inicialmente, em função do valor encontrado para o coeficiente de permeabilidade do subleito, deve-se definir o tipo de sistema de infiltração que será adotado. Em seguida, calcula-se o dimensionamento da base, de acordo com a Equação 1:

$$H_{\text{máx}} = \frac{\Delta Q_c R + P - f T_e}{V_r} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

$H_{\text{máx}}$ = espessura total da camada reservatório (m);

ΔQ_c = precipitação excedente da área de contribuição para uma dada chuva de projeto (m);

R^3 = relação entre a área de contribuição e a área de pavimento permeável (A_c/A_p);

A_c^3 = área de contribuição (m^2);

A_p^3 = área de pavimento permeável (m^2);

P = precipitação de projeto (m);

f = taxa de infiltração no solo (m/h);

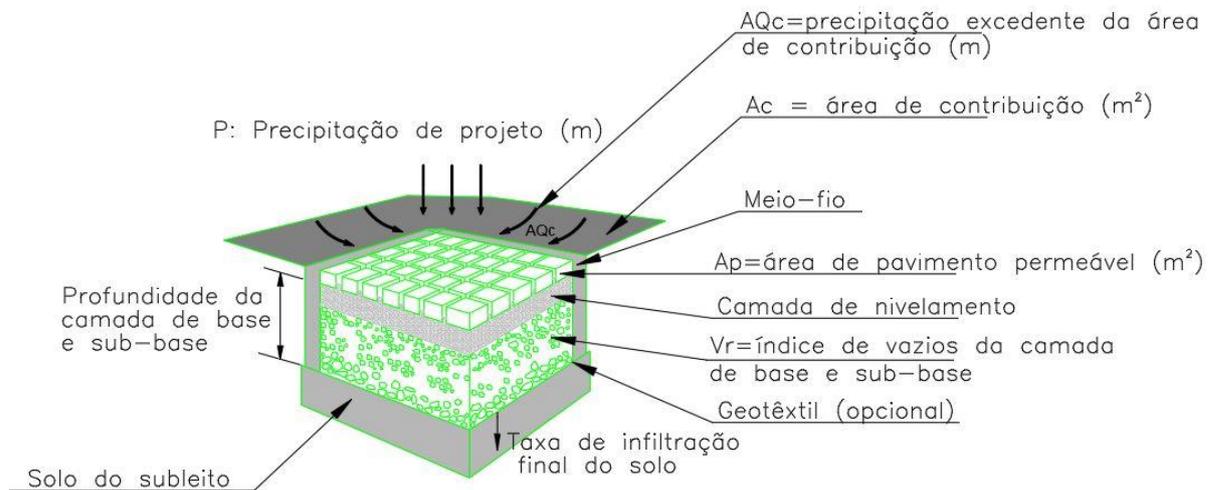
T_e = tempo efetivo de enchimento da camada reservatório, geralmente igual a 2 h (h); e

V_r = índice de vazios da camada.

³ Os valores das áreas de contribuição (A_c) e de pavimento permeável (A_p) são utilizados para determinar o valor de $R = A_c/A_p$.

A Figura 22 especifica os dados que devem ser considerados no dimensionamento hidráulico.

Figura 22 - Dimensionamento hidráulico.



Fonte: Autora (2021) adaptado de ABNT NBR 16416 (2015).

Além dessa metodologia apresentada pela norma brasileira, verifica-se que diversos estudos dimensionam o pavimento pelo método da curva envelope, como é o caso da pesquisa desenvolvida por Moura (2019) e Acioli (2005). Por esse método, a curva de massa, no tempo, dos volumes afluentes ao dispositivo é comparada com a curva de massa dos volumes dele efluentes, e a máxima diferença entre as duas curvas é o volume de dimensionamento. O método pode ser adaptado para qualquer projeto com algum volume de armazenamento (ANDRADE, 2016). Para efeito de cálculo os volumes podem ser expressos em lâminas de água equivalentes sobre a área em planta do dispositivo, através da Equação 2.

$$L_{\max} = \left(\frac{\sqrt{a}}{60} \times \sqrt{\beta} \times T^{b/2} - \frac{\sqrt{c}}{60} \times \sqrt{q_s} \right)^2 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde,

L_{\max} = Lâmina de água⁴ armazenada (mm);

a,b,c = parâmetros da equação IDF Talbot;

T = período de retorno (anos); e

q_s = taxa de infiltração do solo (mm/h).

⁴Entende-se que o Volume = Lâmina x área.

O valor de β é definido pela Equação 3.

$$\beta = \frac{A_{\text{pav}} - A \times C_e}{A_{\text{pav}}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

A_{pav} = Área do pavimento poroso (m^2);

A = área que contribui para pavimento poroso (m^2); e

C_e = coeficiente de runoff.

Para a taxa de infiltração do solo, aplica-se um coeficiente redutor de colmatção (Equação 4).

$$q_s = \alpha \times K_s \quad (\text{Equação 4})$$

Onde,

α = coeficiente redutor devido a colmatção;

K_s = condutividade hidráulica do solo (mm/h);

E por fim a espessura da camada que é definida pela Equação 5.

$$H = \frac{L_{\text{max}}}{n} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde,

H = altura do reservatório (mm);

L_{max} = lâmina armazenada (mm); e

n = porosidade da brita.

O dimensionamento da camada de reservatório depende do sistema de infiltração especificado em projeto. Nesta pesquisa, por se tratar de um pavimento permeável com infiltração total, foi adotada a espessura da camada determinada através do método estabelecido por Ballard *et al.* (2007). Esta metodologia foi aplicada na pesquisa de Antunes (2017). Neste método, a espessura da camada de reservatório pode ser definida em função da Equação 6.

$$H = \frac{d}{n} \times (R \times I - q) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

H = espessura total da camada do reservatório (m);

d = duração da chuva (h);

n = índice de vazios da camada reservatório (adimensional);

R = relação entre a área de contribuição e a área de pavimento permeável;

I = intensidade da chuva (m/h); e

q = taxa de infiltração no solo (m/h).

Rodden *et al.* (2011) menciona o software desenvolvido pela *American Concrete Pavement Association* chamado “*PerviousPave*”, que pode ser utilizado para desenvolver projeto estrutural e hidrológico especificamente para pavimento de concreto permeável. O programa é capaz de: determinar a espessura mínima do pavimento de concreto permeável baseado em questões de tráfego, vida útil e outras variáveis de entrada estruturais (tais como fadiga, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade); e determinar a espessura da sub-base/reservatório necessária para atender aos requisitos de gerenciamento das águas pluviais baseado no volume de água a ser processado pelo pavimento dentro do tempo máximo de detenção necessário.

2.2.7.3 Execução

Recomenda-se adotar as metodologias construtivas dos pavimentos convencionais, desde que as mesmas estejam compatíveis com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015). No caso dos pavimentos intertravados permeáveis e de concreto permeáveis, pode ser adotado o procedimento da ABCP (MARCHIONI, 2021).

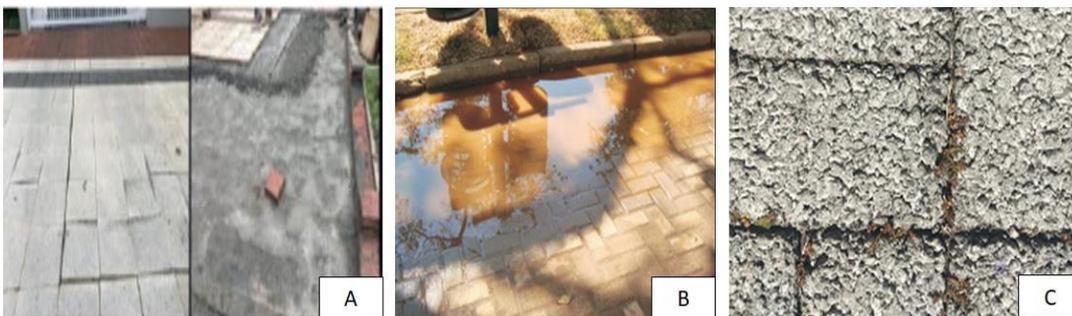
2.3 Manifestações patológicas, conservação e manutenção dos pavimentos permeáveis

A manutenção do pavimento corresponde ao conjunto de operações que são desenvolvidas objetivando manter ou elevar, a níveis desejáveis e homogêneos, as características gerais de desempenho-segurança, conforto e economia do pavimento (DNIT IPR-719, 2006). Segundo Acioli (2005), a garantia do bom funcionamento do pavimento permeável está associada às práticas de operação e manutenção adequada, especialmente no caso do pavimento com revestimento poroso.

A falta de manutenção do pavimento permeável pode ocasionar o surgimento de manifestações patológicas. Tendo em vista que não existe uma norma específica para identificar as manifestações patológicas em pavimentos permeáveis, os defeitos podem ser caracterizados por meio de uma adaptação metodológica da norma 061 do DNIT (2004), que estabelece uma nomenclatura padronizada de defeitos que ocorrem em pavimentos rígidos de concreto de Cimento Portland. De acordo com Marchioni e Oliveira (2010), os principais fatores que reduzem a capacidade de infiltração de água dos pavimentos intertravados permeáveis são: a colmatagem e o crescimento da vegetação.

O estudo realizado por Moura (2019) aponta a existência de manifestações patológicas no pavimento permeável implantado nas calçadas da Rua Nereu Ramos e Alameda Rio Branco, em Blumenau, Santa Catarina. A Figura 23 apresenta as principais manifestações patológicas identificadas.

Figura 23 - Manifestações Patológicas dos pavimentos permeáveis: placa bailarina (A), junta colmatada (B) e aparecimento de vegetação (C).



Fonte: A (Moura, 2019), B (Marchioni e Oliveira, 2010) e C (Autora, 2021).

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), o pavimento permeável deve sofrer intervenções de manutenção sempre que existirem condições que comprometam o desempenho mecânico ou hidráulico do pavimento. Quando o pavimento permeável, após determinado período de utilização, apresentar coeficiente de permeabilidade menor ou igual a 10^{-5} m/s, deve-se executar ações de limpeza com o objetivo de recuperar a capacidade de permeabilidade do pavimento.

Segundo Ribas (2017), a manutenção preventiva é a melhor forma de preservar a capacidade operacional do pavimento permeável, e pode reduzir substancialmente os riscos de mau funcionamento do sistema e futuros gastos com restaurações. Estudos afirmam que, se bem

projetado, executado e conservado, um pavimento poroso possui durabilidade semelhante a de um pavimento comum. Shackel *et al.* (2010), após vários testes realizados em um pavimento de blocos intertravados de concreto permeável, na Austrália, relatam que, mesmo sem manutenção sistemática, as taxas de infiltração do sistema se mantêm adequadas por mais de 10 anos de funcionamento.

Andrade (2016) aponta que a durabilidade dos pavimentos permeáveis é ainda largamente discutida e pesquisada, sendo que não há dúvida de que ela está diretamente ligada aos cuidados tomados na execução, operação e manutenção do dispositivo. De acordo com os estudos de Acioli (2005), os principais fatores que influenciam na durabilidade dos pavimentos permeáveis são:

- rotina de limpeza;
- restrições ao acesso de veículos pesados;
- inspeção na execução e posteriormente à construção;
- pré-tratamento do escoamento de outros locais; e
- controle de sedimentos durante a construção.

Com manutenção adequada, os pavimentos permeáveis podem cumprir suas tarefas precípuas durante 20 anos (HUNT; COLLINS, 2008). De maneira geral, um estudo realizado por Mazzonetto (2011) informa que um sistema de pavimentação permeável pode durar até dez anos com a parte estrutural íntegra, mas é preciso tomar cuidado com a colmatação, isto é, o entupimento das camadas superiores por sujeira.

A obstrução dos poros limita a capacidade de drenagem dos pavimentos permeáveis fazendo com que os mesmos percam esta capacidade. Este problema pode ocorrer devido ao acúmulo de sujeira nos poros do pavimento principalmente devido ao desgaste de pneus. Existem vários métodos de limpeza que são recomendados, porém o que apresenta maior eficiência é uma combinação que consiste em lançar um jato de água e promover a sucção desta água juntamente com a sujeira (SANDBERG, 2002).

Para pavimentos com revestimento poroso, a EPA (1999) sugere uma rotina de manutenção preventiva que deve incluir sucção à vácuo dos poros pelo menos quatro vezes ao ano, com eliminação apropriada do material removido, seguida de injeção de água com mangueira de alta pressão, de forma a manter os poros abertos e limpos. No caso de concreto permeável moldado in loco, a manutenção é feita com a retirada de 3 ou 4 cm da camada mais externa, que será substituída por uma nova. Vale salientar que a ABNT NBR 16416 (2015) recomenda que os reparos realizados no pavimento utilizem os mesmos tipos de materiais do pavimento existente, sendo vetada a utilização de revestimentos impermeáveis ou outros materiais que evidenciem o reparo ou prejudiquem o desempenho do pavimento.

O Quadro 4 apresenta as técnicas de manutenção recomendadas por NRMCA (2015) e Razzaghmanesh e Beecham (2018), com as respectivas periodicidades.

Quadro 4 - Periodicidade da manutenção.

ATIVIDADE	PROGRAMAÇÃO/PERIODICIDADE
Inspeção visual	Mensal, no caso de haver ocorrência de eventos volumosos de precipitação, ou semanal
Limpeza (vassoura ou sopro)	Rotineira
Limpeza superficial com aspiração potente	Semestral ou trimestral
Ensaio de taxa de infiltração	Trimestral
Jateamento de água sob pressão	Quando a taxa de infiltração for reduzida para 25 % da inicial

Fonte: Adaptado de NRMCA (2015) e Razzaghmanesh e Beecham (2018).

A Figura 24 apresenta os equipamentos que são comumente utilizados para manutenção dos pavimentos permeáveis.

Figura 24 - Equipamentos utilizados para manutenção: nas calçadas em Recife (A), varrição em quintais (B) e em vias (C).



Fonte: A (PREFEITURA DO RECIFE, 2014); B (KARCHER,2020); C (PR-1, 2020).

A EPA (2016) recomenda a limpeza do pavimento poroso com equipamentos à vácuo, no mínimo 4 vezes por ano, e/ou lavagem com mangueira de pressão de água, no intuito de remover as partículas e evitar a colmatção.

2.4 Custos para implantação e manutenção dos pavimentos permeáveis

De acordo com Acioli (2005), seja do ponto de vista econômico ou financeiro, a análise de custos deverá avaliar não apenas os gastos iniciais da obra, mas de toda a sua vida útil, incluindo os custos de possíveis operações futuras, de manutenção e de reposição que possam vir a incorrer de modo que o sistema possa desempenhar o papel para o qual foi projetado. Dessa forma, a Tabela 4 apresenta os custos de implantação, operação e manutenção de diferentes tipos de pavimentos.

Tabela 4 - Custos de Implantação, Operação e Manutenção (R\$/Ano) de pavimentos permeáveis.

ESTRUTURA DOS PAVIMENTOS	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO (R\$)		CUSTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (R\$/Ano)	
	UNIDADE	ANO: 2022 ⁵	UNIDADE	ANO: 2022 ⁵
Concreto permeável	m ²	113,00	m ²	6,63
Asfalto permeável	m ²	82,86	m ²	3,39
Bloco de concreto vazado	m ²	150,02	m ²	9,04
Intertravado	m ²	50,24	m ²	19,30

Fonte: Adaptado de NUCASE (2007).

⁵ Foi realizada a atualização de preços de Janeiro/2007 para Janeiro/2022 através dos índices de reajustamento de obras rodoviárias (Fundação Getúlio Vargas) – DNIT.

Na atualidade, os pavimentos permeáveis apresentam custos de implantação bastante similares aos pavimentos tradicionais. Considerando a redução dos custos relacionados ao sistema de drenagem a jusante, identifica-se, claramente, o interesse de utilização deste tipo de dispositivo. Porém, os riscos de colmatação podem implicar em redução da vida útil e custos de manutenção significativos (BARRAUD, 2005). A Tabela 5 apresenta os resumos dos custos (R\$/km) para pavimentos convencionais e permeáveis, de acordo com as etapas de execução dos serviços.

Tabela 5 - Resumo dos custos (R\$/km).

DESCRIÇÃO DO SERVIÇO	CONVENCIONAL (R\$/km)	PERMEÁVEL (R\$/km)	DIFERENÇA (%)
TERRAPLENAGEM	95.901,68	95.901,68	0,00
DRENAGEM	502.386,35	346.946,07	-30,94
PAVIMENTAÇÃO	881.929,40	1.122.717,02	27,30
OBRAS COMPLEMENTARES	585.697,56	585.697,56	0,00
SINALIZAÇÃO	13.809,52	13.809,52	0,00
CANTEIRO DE OBRAS	204.604,06	204.604,06	0,00
TOTAL	2.284.328,58	2.369.675,91	3,74

Fonte: Motta (2020).

De acordo com Balbo (2020), é notável observar que os pavimentos de concreto permeáveis podem custar 25 % a 30 % a mais que os pavimentos de concreto simples convencionais, que por sua vez são bem mais caros que os pavimentos asfálticos convencionais (nos Estados Unidos). Já os pavimentos em blocos de concreto intertravados permeáveis podem custar 60 % a mais que os pavimentos de concreto permeáveis. Os pavimentos em blocos de concreto perfurados com grama, apesar de serem menos custosos, não se aplicam a quaisquer situações. A Tabela 6 mostra os custos e durabilidades esperados para pavimentos novos.

Tabela 6 - Custos e durabilidades esperados para pavimentos novos.

TIPO BÁSICO DE PAVIMENTO	MATERIAIS	CUSTO* (R\$/m ²)	VIDA ESTIMADA (anos)
Asfáltico convencional	Mistura asfáltica a quente	4,50 a 65,00	7 a 20
De concreto convencional	Concreto simples	13,00 a 194,00	15 a 35
Permeável	Camada porosa de atrito	86,00 a 108,00	7 a 10
	Concretos permeáveis	215,00 a 269,00	15 a 20
	Blocos permeáveis	215,00 a 430,00	> 20
Permeável (furado) com vegetação	Blocos com grama	65,00 a 248,00	> 10

Fonte: Balbo (2020) adaptado de EPA(2008). *Data-base de conversão: 08/2019.

Diante dos estudos apresentados, verifica-se que, com relação ao custo de construção de pavimentos permeáveis, estes geralmente são aproximadamente 10 % mais caros do que pavimentos equivalentes não permeáveis. Em compensação, os gastos com medidas estruturais à jusante são menores quando se utiliza pavimentos permeáveis (SORVIG, 1993⁹ *apud* WRIGHT; HEANEY, 2004).

2.5 Desempenho dos pavimentos permeáveis

O desempenho do pavimento permeável deve considerar a análise da estrutura física e a mensuração do desempenho hidráulico (MOURA; PEIXER; MUNIZ, 2019).

2.5.1 Desempenho hidráulico

Segundo Azzout *et al.* (1994), o funcionamento hidráulico dos pavimentos permeáveis baseia-se em:

- entrada imediata da água da chuva no corpo do pavimento. Essa entrada pode ser feita de forma distribuída (no caso de revestimento poroso, que permitem a penetração da água) ou localizadamente (através de drenos laterais ou bocas de lobo);
- estocagem temporária da água no interior do pavimento, nos vazios da camada do reservatório; e
- evacuação lenta da água, que é feita por infiltração no solo, pela liberação lenta para a rede de drenagem, ou uma combinação das duas formas.

Quando se considera a captação de águas pluviais em pavimentos permeáveis de concreto permeável moldado no local, duas condições devem ser consideradas: permeabilidade e capacidade de armazenamento. O projeto deve garantir que a permeabilidade seja suficiente para acomodar toda a chuva que caia na superfície com taxas de permeabilidade superiores a 1 cm/s para dar vazão a pelo menos 200 l/m²/min com capacidade de armazenamento de 4 mm de precipitação a cada 25 mm de espessura do piso (TENNIS *et al.*, 2004).

2.5.1.1 Determinação do coeficiente de permeabilidade

A ABNT NBR 16416 (2015) define o coeficiente de permeabilidade (k), como sendo o parâmetro que representa a velocidade com que uma determinada quantidade de água percola um elemento ou estrutura permeável. Para determinação do coeficiente de permeabilidade, esta pesquisa adotou o procedimento (Figura 25A) estabelecido pela própria norma (Tabela 7).

Tabela 7 - Determinação do coeficiente de permeabilidade.

TIPO DE REVESTIMENTO	MÉTODO DE ENSAIO		COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE DO PAVIMENTO RECÉM CONSTRUÍDO (m/s)
	LOCAL DE AVALIAÇÃO		
	EM LABORATÓRIO	EM CAMPO	
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	ANEXO A ⁶	ANEXO A	> 10 ⁻³
Peça de concreto permeável	NBR 13292 : 2021 ou		

⁶ O Anexo A contido na ABNT NBR 16416 (2015) especifica o procedimento, os equipamentos necessários e os cálculos para a determinação do coeficiente de permeabilidade do pavimento permeável.

Placa de concreto permeável	ANEXO A		
Concreto permeável moldado no local			

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

O *American Concrete Institute* (ACI 522R, 2006) propõe um método que utiliza um permeâmetro de carga variável (Figura 25B), onde a amostra de concreto permeável (com dimensões de 150mm de comprimento e diâmetro de 95mm) é instalada. Este equipamento foi elaborado por Neithalath *et al.* (2003) e a descrição do procedimento é abordada nos estudos apresentados por Sales (2008) e Marchioni e Silva (2016).

Além dos procedimentos supracitados, a ISO 17785-1 (2016) apresenta uma forma simplificada (Figura 25C) para determinação do coeficiente de permeabilidade dos revestimentos permeáveis. Este método consiste em medir o tempo para que uma determinada quantidade de água atravesse um corpo de prova cilíndrico de concreto permeável envolto por uma película de plástico. Vale salientar que já foi utilizado em diversos estudos, como os de Batezini (2013), Almeida (2016) e Galvão (2017). A Figura 25 mostra os diferentes métodos para determinação do coeficiente de permeabilidade.

Figura 25 – Métodos para determinação do coeficiente de permeabilidade: A (campo); B (ABNT NBR 13292) e C (ISO 17785-1).



Fonte: A (AUTORA, 2021); B (MARCHIONI; SILVA, 2016); C (GALVÃO, 2017).

De acordo com Batezini (2013), o coeficiente de permeabilidade (ou condutividade hidráulica) é um dos parâmetros mais importantes do concreto permeável. Tennis *et al.* (2004) aponta que os valores de coeficientes normalmente encontrados no concreto permeável estão entre 0,21 cm/s e 0,54 cm/s. A norma ACI 522R (2010) estabelece como valor mínimo para o concreto permeável um coeficiente de infiltração superior a $1,40 \times 10^{-3}$ m/s.

2.5.1.2 Verificação da redução do escoamento superficial ou run-off

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), o escoamento superficial corresponde a parte da água precipitada que escoar sobre a superfície. Quando os escoamentos das águas de chuva ocorrem de forma desordenada, podem provocar, isolada ou conjuntamente, problemas como a inundação urbana, erosão e assoreamento do sistema de drenagem, segundo o Manual de drenagem e manejo das águas pluviais do Recife (2016).

Dessa forma, o controle do escoamento superficial é um dos princípios do Plano Diretor do Recife (PDDR), e pode ser reduzido através da implantação de um sistema de drenagem que promova o armazenamento das águas pluviais. Diante desse contexto, os pavimentos permeáveis podem ser utilizados para retardar o escoamento superficial nos passeios, parques, estacionamentos e vias públicas de tráfego leve.

Com relação ao coeficiente de escoamento ou deflúvio superficial, a Prática Recomendada PR-2 (2016), especifica que parte da água da chuva penetra no terreno, parte é retida pela vegetação, parte se acumula em lagos e barragens, e parte escoar pela superfície. Esta parcela que escoar pela superfície é chamada "deflúvio superficial" ou "run-off" em inglês. O coeficiente de escoamento é a relação entre o volume total escoado pela seção de controle e o volume total precipitado.

Os pavimentos permeáveis podem apresentar coeficientes de escoamento inferiores a 0,05, e isto significa que cerca de 95% das águas pluviais vai ser infiltrada. Esta informação é corroborada pelo estudo de Goldenfum, Tucci e Araújo (2000), que realizaram uma simulação de chuva em diferentes tipos de superfícies (solo compactado, pavimentos impermeáveis, pavimentos semi-permeáveis e pavimentos permeáveis) no intuito de verificar a redução de escoamento superficial provocada pela implantação de revestimentos permeáveis. A Figura 26 apresenta as superfícies analisadas.

Figura 26 – Superfícies analisadas.



Fonte: Goldenfum, Tucci e Araújo (2000).

Os valores de coeficiente de escoamento encontrados (Tabela 8) mostram que nos pavimentos permeáveis praticamente não ocorreu escoamento superficial.

Tabela 8 – Resultados dos coeficientes de escoamento nas superfícies analisadas.

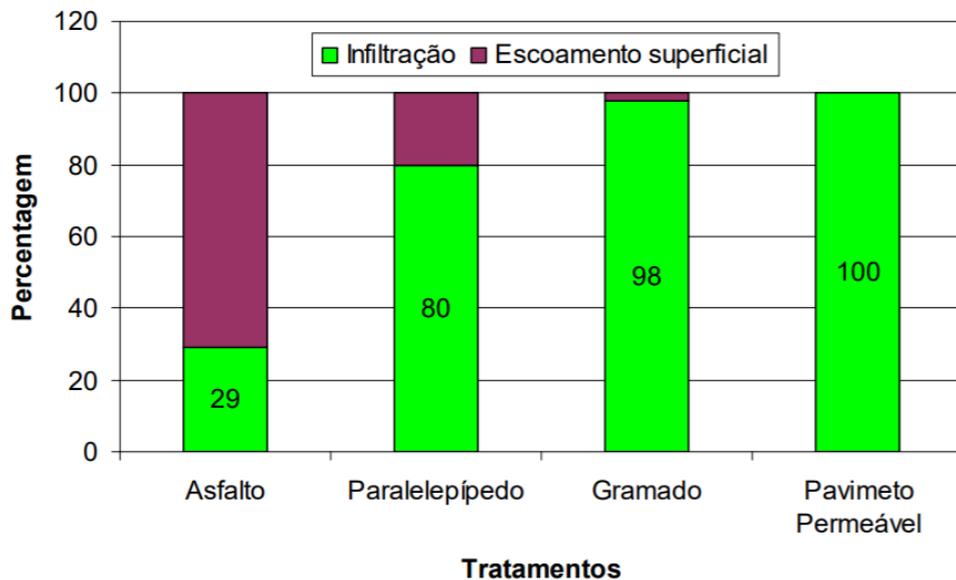
Coeficiente de escoamento	Solo compactado	Concreto	Bloco de concreto	Paralelepípedo	Concreto Permeável	Blocos Vazados
Resultados	0,66	0,95	0,78	0,60	0,005	0,03

Fonte: Goldenfum, Tucci e Araújo (2000).

De acordo com Guedes *et al.* (2013), o coeficiente de escoamento (C) é um coeficiente adimensional que relaciona a quantidade de escoamento superficial para a quantidade de volume de precipitação recebida. Nas áreas com baixa infiltração, o coeficiente de escoamento é maior, e apresenta valores menores para áreas permeáveis e bem vegetadas. Dessa forma, pode-se concluir que, quanto maior o coeficiente de permeabilidade, maior será a permeabilidade da área e, conseqüentemente, menor será o coeficiente de escoamento.

Vale ressaltar a pesquisa de Buriol *et al.* (2007) que avalia a eficiência de diferentes tipos de pavimentos urbanos na infiltração de água no solo e na redução do escoamento superficial. De acordo com os resultados (Figura 27) verificou-se que o uso de pavimento permeável reduziu o escoamento superficial em 100 % e o gramado em 97,63 %. Desta forma, pode-se concluir que a utilização dos pavimentos permeáveis podem melhorar a qualidade da água e minimizar as enchentes nas cidades.

Figura 27 – Percentagem (%) de água infiltrada e escoada superficialmente com uma precipitação de 236,62 mm acumulada no período.



Fonte: Buriol *et al.* (2007).

2.5.2 Desempenho mecânico

As propriedades mecânicas dos concretos permeáveis são fundamentais, pois definem a espessura da camada de pavimento e suas características de durabilidade. As principais propriedades de interesse para o dimensionamento das misturas de concretos permeáveis são: resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência à fadiga, resistência à abrasão e ainda congelamento e degelo. Alguns estudos indicam que os melhores resultados de resistências mecânicas estão associados ao equilíbrio das relações entre o agregado/cimento e água/cimento. Outro fator preponderante é a mineralogia do agregado empregado que em função da sua origem pode apresentar melhores resultados de aderência à pasta de cimento, melhorando as resistências das misturas de concreto permeável.

Outros autores indicam que a energia de compactação influencia diretamente nas propriedades mecânicas. A norma nacional para pisos permeáveis define que os ensaios de compressão sejam aplicados apenas nos blocos de pavimentos intertravados, enquanto que o ensaio de resistência à tração na flexão seja aplicado nas placas e concretos moldados no local.

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), o revestimento permeável deve atender às especificações apresentadas na Tabela 9.

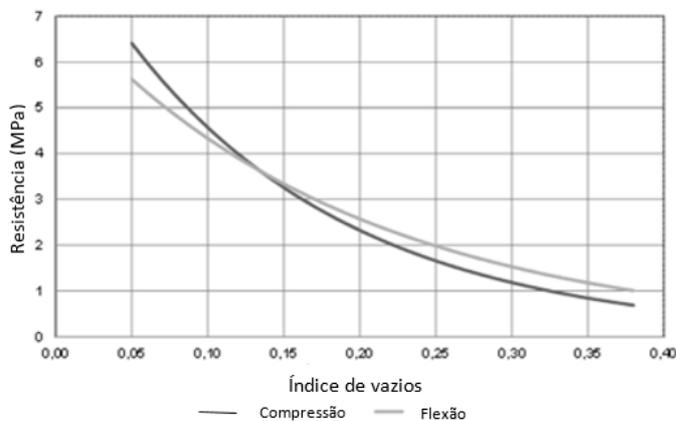
Tabela 9 - Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável.

TIPO DE REVESTIMENTO	TIPO DE SOLICITAÇÃO	ESPESSURA MÍNIMA (mm)	RESISTÊNCIA MECÂNICA CARACTERÍSTICA (MPa)	MÉTODO DE ENSAIO	
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 35,0^a$	Resistência à compressão 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	$\geq 2,0^b$		Resistência à flexão NBR 15805:2015
	Tráfego leve	80,0			
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60,0	$\geq 1,0^c$	Resistência à tração na flexão NBR 12142:2010	
	Tráfego leve	100,0	$\geq 2,0^c$		

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015).

Com relação às resistências à compressão e à tração na flexão, foi determinado que ambas são inversamente proporcionais ao volume de vazios existente (Figura 28), ou seja, quanto maior o volume de vazios, menor será a resistência mecânica (BATEZINI, 2013).

Figura 28 – Resistência à compressão (dividido por 10) e resistência à tração na flexão em função da variação do índice de vazios).



Fonte: (DELLATE, *et al.*, 2009).

Mazzonetto (2011) ressalta que a resistência varia inversamente à permeabilidade, e por isso, o aumento da porosidade do concreto diminui a sua resistência. Dessa forma, há limitações no uso do concreto permeável, sendo este indicado para locais onde a resistência é menos relevante (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Segundo Antunes (2017), diversos pesquisadores ao redor do mundo têm estudado os materiais, suas especificações e proporções ideais para melhoria da resistência e da permeabilidade do concreto permeável. Todavia, segundo Chindaprasirt *et al.* (2008), a condição ótima para produzir um bom concreto permeável ainda não está consolidada.

O método de mistura e compactação para produzir o concreto permeável com alta resistência e durabilidade para um dado índice de vazios projetado ainda precisa ser melhor estudado. Esse fato pode ser justificado devido à peculiaridade do concreto permeável precisar apresentar vazios para garantir a permeabilidade e, simultaneamente, garantir uma boa resistência mecânica. Yang e Jiang (2002) apontam que as propriedades mecânicas do concreto permeável podem ser melhoradas através de agregados selecionados, aditivos e polímeros orgânicos; desta maneira, a resistência à compressão (f_{pk}) pode chegar a 50 MPa e resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) de 6 MPa.

2.5.3 Determinação das propriedades físicas dos materiais

As propriedades do concreto permeável dependem da granulometria, quantidade de cimento, relação água/cimento e quantidade de vazios. A graduação do agregado graúdo influencia diretamente sua resistência e permeabilidade, que são fatores importantes para o desempenho do concreto permeável (CHAVES; MOREIRA, 2015; OLIVEIRA *et al.*, 2017; BOTTEON, 2017).

Polastre e Santos (2006) mencionam que o concreto deve possuir um alto índice de vazios interligados, garantindo assim a permeabilidade do concreto. Utilizado com pouca ou nenhuma porção de areia na sua composição, é permitido a percolação de grande quantidade de fluido. Segundo Henderson *et al.* (2009), ao se reduzir a quantidade de agregado miúdo ou simplesmente eliminá-lo da mistura de concreto, o índice de vazios pode aumentar para valores entre 15 a 25 %. Dessa maneira, a água proveniente das precipitações poderá percolar

por meio dos poros da placa de concreto, diminuindo consideravelmente a quantidade de escoamento superficial das águas pluviais.

Dependendo da sua aplicação, o concreto permeável pode apresentar índice de vazios entre 15 % a 40 %, enquanto que o índice de vazios do concreto convencional varia entre 3 % e 5 % (MULLIGAN, 2003). A presença de vazios é a principal característica física esperada dos concretos permeáveis para o uso em pavimentos permeáveis, tendo em vista este ser o fator que impacta diretamente nas propriedades drenantes do material (BECHARA, 2017).

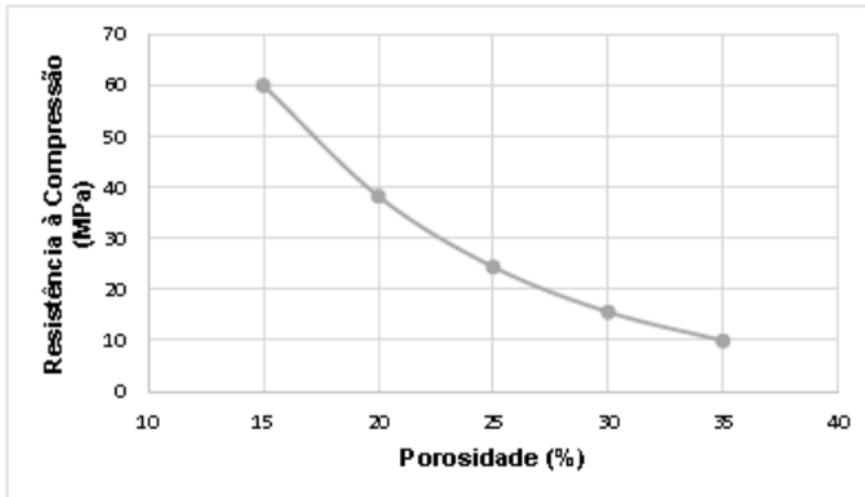
O coeficiente de permeabilidade depende diretamente da estrutura de vazios presente no concreto permeável. Segundo Kevern *et al.* (2006), a quantidade de vazios que permite o movimento da água no interior do concreto depende do grau de compactação e de características do agregado. Quanto maior o índice de vazios, maior é o coeficiente de permeabilidade. O uso de agregados de maiores diâmetros produz um concreto de maior índice de vazios o que aumenta a permeabilidade (BHUTTA *et al.*, 2012; JAIN; CHOUHAN, 2011).

Diante deste contexto, pode-se dizer que a permeabilidade do concreto permeável depende dos materiais constituintes da sua mistura e da sua aplicação em campo. De acordo com Kevern *et al.* (2006), os coeficientes de permeabilidade típicos estão entre 0,2 cm/s e 0,54 cm/s, e já foram medidos até 1,2 cm/s em ensaios de laboratório. Vale ressaltar, que a aplicação de aditivos no concreto permeável também pode interferir na sua capacidade de permeabilidade.

A permeabilidade e a porosidade também podem ser relacionadas com a resistência à compressão. De acordo com Mulligan (2003), a resistência à compressão aumenta com a presença de mais cimento na mistura, o que reduz a relação água/cimento. Lian *et al.* (2011)

estudaram a relação entre resistência à compressão e porosidade, os dados obtidos (Figura 29), demonstraram que a resistência à compressão do concreto permeável decresce com o aumento da sua porosidade para um dado traço. As duas variáveis apresentaram correlação de 0,90.

Figura 29 – Relação entre porosidade e resistência à compressão.



Fonte: Lian *et al.* (2011).

O estudo de Batezini (2013) resalta algumas das principais características dos concretos permeáveis estudados por diversos autores, dentre elas estão: o índice de vazios, a massa unitária (Kg/m^3), condutividade hidráulica (cm/s), consumo de cimento (kg/m^3), a resistência à compressão (MPa) e a resistência à tração na flexão (MPa). De maneira geral, pode-se dizer que as principais propriedades do concreto permeável endurecido são: massa específica, permeabilidade e índice de vazios, resistência à compressão e à flexão e a durabilidade.

Com relação aos materiais constituintes das camadas granulares (base e sub-base) do pavimento permeável, Schueler (1987) especifica que a porosidade destes materiais interfere diretamente na capacidade de armazenamento (reservatório) dos pavimentos. Portanto, a porosidade é um elemento fundamental na determinação da espessura da camada de reservatório. Os vazios existentes entre o material granular serão responsáveis pelo desempenho da estrutura projetada, pois permitirão a percolação da água e possibilitarão maior ou menor armazenamento da água de chuva (PINTO, 2011).

Segundo Tomaz (2009), os agregados são os materiais mais utilizados para construção das bases, devendo ser rígidos, duráveis, de formato angular não arredondado, para compactação adequada e manutenção da estrutura de vazios. A Tabela 10 apresenta a porosidade para diferentes tipos de agregados que compõem as camadas granulares do pavimento permeável.

Tabela 10 – Materiais para a base e as suas porosidades.

MATERIAL	POROSIDADE (n)
Sistema geocelular ⁷	0,90 a 0,95
Agregado uniforme	0,30 a 0,40
Areia ou agregado graduado	0,20 a 0,30

Fonte: Ballard *et al.* (2015).

Com relação às propriedades dos agregados, Gonçalves (2001) especifica que os agregados reciclados (provenientes de resíduos de concreto) possuem algumas diferenças em relação aos agregados naturais, e estas estão principalmente relacionadas à quantidade de argamassa do concreto original aderida à superfície dos mesmos. Esta camada de argamassa aderida influencia desde as propriedades do agregado, até as do concreto feito com ele, seja no estado fresco ou endurecido. Como exemplo, foram listadas algumas destas diferenças, onde os dados apresentados referem-se às propriedades dos agregados reciclados quando comparadas aos agregados naturais de mesmas características (Quadro 5).

Quadro 5 - Diferença entre as propriedades dos agregados reciclados e dos agregados naturais.

PROPRIEDADES	PROPRIEDADE DO AGREGADO RECICLADO EM COMPARAÇÃO COM O NATURAL
Porosidade	Maior
Absorção de água	Maior
Massa específica	Menor

Fonte: Gonçalves (2001).

No intuito de aumentar o desempenho dos pavimentos permeáveis, o estudo de Peng *et al.* (2017) desenvolveu um concreto permeável inovador, e de alta resistência, superando os obstáculos do concreto permeável tradicional (baixa resistência, entupimento do concreto e dificuldade de manutenção). Para tanto foi projetado e fabricado um concreto reativo em pó

⁷ Sistema geocelular são unidades modulares de plástico que podem ser utilizadas para criar estruturas subterrâneas para o armazenamento temporário de águas superficiais antes da liberação controlada do uso.

(RPC), como matriz do concreto inovador permeável de alta resistência (HSPC). Este material é um composto com características de alta resistência, tenacidade e durabilidade. Os resultados experimentais realizados com este concreto, apontaram uma resistência à compressão de 61,37 MPa e um coeficiente de permeabilidade de 13,02 mm/s, indicando um bom desempenho.

2.6 Revisão sistemática por método PRISMA

A seguir, é apresentado o método de desenvolvimento da revisão sistemática para o desempenho dos pavimentos permeáveis. Assim, a estratégia de pesquisa adotada para a elaboração desta revisão considera as indicações do método PRISMA (LIBERATI *et al.*, 2009).

➤ *Estratégia de pesquisa*

Esta revisão sistemática foi baseada nas diretrizes do modelo PRISMA, *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-analyses* (LIBERATI *et al.*, 2009). Inicialmente os artigos selecionados para esta revisão foram pesquisados no Portal de Periódicos da CAPES e as palavras-chave utilizadas na busca foram *permeable, pavement, performance, interlocking concrete, permeability e resistance*. Paralelamente foram efetuadas buscas diretamente no google acadêmico.

➤ *Critérios de inclusão*

No caso dos artigos obtidos do Portal da CAPES, foram incluídos aqueles publicados nos 5 últimos anos e, revisados por pares.

➤ *Critérios de exclusão*

Foram excluídos os artigos repetidos, e de acordo com os títulos e resumos, aqueles que não abordassem parâmetros das propriedades analisadas: permeabilidade e resistência.

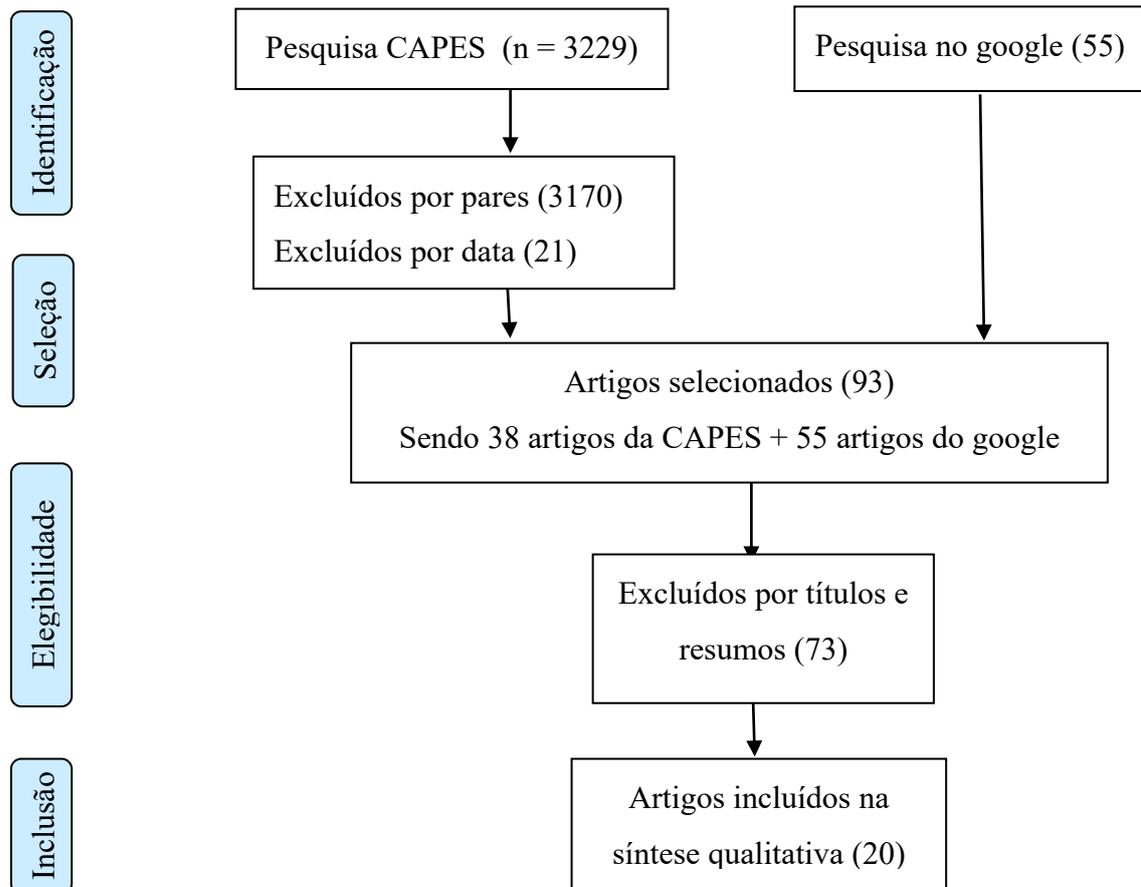
➤ *Seleção dos estudos*

Os artigos que restaram depois de aplicados os critérios descritos foram analisados com base nos títulos e resumos. Posteriormente, os artigos selecionados foram lidos por completo e foram selecionados de acordo com sua relevância dentro do tema proposto.

Utilizando a estratégia PRISMA de pesquisa, inicialmente no Portal da CAPES, foi inserida a palavra chave “*permeable pavement*” e foram encontrados 3.229 artigos. Ao incluir a palavra “*performance*”, restaram 1.818; em seguida, foram inseridas as palavras “*interlocking concrete*”, “*permeability*” e “*resistance*”, e a quantidade de artigos encontradas passou a ser 232, 120 e 62, respectivamente. Destes, 59 artigos foram revisados por pares. Depois da aplicação destes critérios de inclusão, foram selecionados os artigos publicados nos 5 últimos anos, onde restaram 38 artigos para esta revisão bibliográfica. Paralelamente, foram efetuadas buscas de artigos diretamente no site do Google (53). Por fim, foi realizada a leitura dos títulos e resumos dos 91 artigos encontrados no Portal da CAPES e no site do google, resultando na seleção final de 18 artigos.

A Figura 30 apresenta o fluxograma de todo o processo de seleção que foi desenvolvido.

Figura 30 - Processo de seleção dos artigos.



Fonte: Autora (2021).

Na Tabela 11 encontra-se um resumo de pontos importantes dos trabalhos selecionados para compor o referencial teórico, sendo eles: autor, país, ano e título do trabalho.

Tabela 11 - Resumo dos artigos selecionados.

Nº	Autor	País	Ano	Título do trabalho
1	Martins filho <i>et al.</i>	Brasil	2020	Caracterização de concreto permeável com foco em ensaios não destrutivos
2	Botelho	Brasil	2020	Concreto permeável: análise de desempenho voltada para pavimentação, a fim de combater inundações em centros urbanos
3	Zvonarić	Croácia	2020	Influência do entupimento e propriedades da camada de base nas características de drenagem do concreto permeável
4	Mazzutti <i>et al.</i>	Brasil	2019	Verificação da resistência à compressão simples de blocos intertravados drenantes

Nº	Autor	País	Ano	Título do trabalho
5	Moura	Brasil	2019	Análise técnica de pavimentos permeáveis: aspecto físico, hidráulico e manifestações patológicas
6	Oliveira, Becciu, e Marchioni	Itália	2019	Sistema de infiltração-exfiltração para controle de águas pluviais: um teste em escala real
7	Batista <i>et al.</i>	Brasil	2019	Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego utilizando agregado graúdo regional
8	Donato	Brasil	2019	Pavimento de concreto drenante: estudo da granulometria que favorece a drenagem e que afete o mínimo na resistência
9	Chen, Yang, e Lin	China	2019	Estudo sobre o processo e características de entupimento para tijolo cerâmico permeável.
10	Yamin <i>et al.</i>	Indonésia	2019	Propriedades avançadas de concreto permeável de gradação contínua para camada de base de pavimento rígido
11	Rahman, Rahman, e Kuruppu	Alemanha	2019	Pavimento permeável como melhor prática de gestão de águas pluviais: uma revisão e discussão
12	Mwasha, Tota-Maharaj, e Monrose	Inglaterra	2019	Avaliação das características físicas e da qualidade do efluente pluvial de sistemas de pavimentos permeáveis contendo materiais reciclados
13	Anisah e Mulyono	Indonésia	2019	Propriedades do concreto permeável com vários tipos e tamanhos de agregados
14	Silva	Brasil	2018	Determinação do coeficiente de permeabilidade de elementos drenantes de concreto
15	Marques	Brasil	2018	Análise das propriedades mecânicas e drenantes do pavimento permeável com adição de materiais alternativos
16	Vračević <i>et al.</i>	Suécia	2018	Avaliação das características de desgaste de pavimentos de concreto permeável

Nº	Autor	País	Ano	Título do trabalho
17	Korat <i>et al.</i>	Eslovênia	2018	Capacidade de drenagem do concreto permeável de tamanho singular
18	Girardi e Finocchiaro	Brasil	2017	Concreto permeável produzido com agregado reciclado
19	Borst e Razzaghmanesh	USA	2018	Investigação da dinâmica de entupimento de sistemas de pavimentos permeáveis usando sensores embutidos
20	Marchioni, M., Becciu, G, Silva, C.	USA	2015	Critical analysis of the Brazilian national standard for concrete permeable pavement.

Fonte: Autora (2021).

O estudo de Martins Filho *et al.* (2020) aplicou ensaios não destrutivos para investigar as propriedades do concreto permeável. Para tanto, foi aplicado o método do ultrassom em 3 traços com a relação pasta/agregado variando de 0,45 a 0,65, e relação a/c de 0,3. Os resultados mostraram que a Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) variou de 3642 até 4262 m/s para uma redução de aproximadamente 12 % na porosidade, com alta correlação (R^2) de 0,91. Vale destacar que a alta porosidade do concreto provocou atenuação da onda ultrassônica. Além disso, as medições da VPU retrataram valores maiores para os corpos de prova com maiores densidades ($R^2 = 0,87$), maiores resistências à compressão e à tração (R^2 de 0,79 e 0,84, respectivamente), e menores permeabilidades ($R^2 = 0,91$).

A pesquisa de Botelho (2020), no intuito de atingir a relação permeabilidade/resistência, verificou a melhor relação existente entre o teor de agregados e a relação água/cimento. Os valores obtidos para resistência foram da ordem de 10 MPa aos 28 dias. Com relação à permeabilidade, o concreto permeável atingiu os aspectos normativos esperados; enquanto que Zvonari'Ć (2020) buscou avaliar a influência do entupimento nas características drenantes dos materiais utilizados na pavimentação do concreto permeável, bem como a influência das propriedades da camada de base nas características drenantes de todo o sistema de pavimentação, e verificou que o concreto permeável produzido com uma fração de agregado menor é mais propenso ao entupimento.

Mazzutti *et al.* (2019) apresentou uma relação entre a resistência à compressão simples (RCS) e a permeabilidade em diferentes traços de *pavers* (tradicional e drenantes). Quanto à resistência, o novo traço de *paver* drenante obteve ganhos significativos em relação ao desenvolvido por Taschetto (2017), porém não atingiu a resistência mínima à compressão de 35 MPa para uso em pavimentos, sendo recomendado para passeios públicos. No que diz respeito à infiltração, o novo *paver* drenante desenvolvido na pesquisa apresentou um desempenho 45 vezes melhor em relação ao tradicional.

O trabalho de Moura (2019) teve como objetivo analisar o pavimento permeável implantado nas calçadas em Santa Catarina, apresentando uma proposta alternativa de melhorias técnicas para o pavimento existente, baseada no dimensionamento hidráulico do reservatório por meio do método da “curva envelope”. A análise apontou inadequações na estrutura do pavimento, tais como baixa capacidade de reservação de água, baixo coeficiente de permeabilidade do revestimento e defeitos do tipo “placa bailarina”.

A pesquisa de Oliveira, Becciu e MARCHIONI (2019) estudou o comportamento de uma pista experimental, com camada superficial em concreto permeável, instalada em São Paulo (Brasil). Verificou-se que o concreto permeável apresentou resultados mecânicos aceitáveis para um baixo fluxo de veículos e uma taxa de infiltração que permitiu a infiltração da água. O estudo de Batista *et al.* (2019) produziu um concreto permo-poroso, com o objetivo de identificar as possíveis vantagens quanto ao uso em pavimentos urbanos de baixo tráfego. Observou-se que todos os traços alcançaram o limite mínimo de compressão axial e desempenho satisfatório de permeabilidade estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015).

O estudo de Donato (2019) baseou-se na produção de um concreto drenante, que de acordo com os parâmetros da ABNT NBR 16416 (2015), apresentou uma resistência mecânica satisfatória, entre 14 e 27 MPa, e uma permeabilidade variando de 6 a 49 L/s/m².

Chen, Yang e Lin (2019) avaliaram a influência do entupimento na permeabilidade dos tijolos permeáveis investigando as causas e os processos. Os resultados mostraram que o risco de entupimento do tijolo permeável foi extremamente alto podendo resultar em um entupimento completo num período de 5 a 10 anos, sob as condições experimentais.

Yamin *et al.* (2019) realizaram uma pesquisa baseada no estudo de uma mistura de concreto permeável utilizando um agregado graduado continuamente como camada de base de um pavimento rígido. Foi realizada uma análise das propriedades, como o módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, resistência à flexão, permeabilidade horizontal, nível de heterogeneidade e módulo de elasticidade dinâmico. Verificou-se que o concreto permeável com gradação contínua é mais elástico fisicamente quando comparado ao concreto normal e apresenta uma melhor resistência à deformação elástica; além disso, o seu módulo de elasticidade estático tem uma relação melhor com a permeabilidade horizontal do que com a resistência à flexão.

Rahman, Rahman e Kuruppu (2019) apresentaram uma revisão bibliográfica sobre pavimentos permeáveis ressaltando as limitações de sua aplicabilidade. Este estudo destacou a influência dos fatores de projeto, tais como o tipo de pavimento permeável, o tamanho e a distribuição dos agregados, a profundidade da sub-base, e a configuração da camada nos desempenhos hidráulico, estrutural e ambiental do pavimento. Os resultados desta revisão demonstraram que a absorção de água pluvial pelos sistemas de pavimento permeável é relativamente limitada e lenta devido à falta de conhecimento científico aprofundado e às incertezas econômicas.

A pesquisa de Mwashia, Tota-Maharaj e Monrose (2019) avaliou as características físicas de dois materiais reciclados para uso em pavimentação permeável: agregados de concreto triturados (CCA) e grânulos de poliestirenos expandidos delimitados por cimento (C-EPS). Observou-se que ambos apresentaram propriedades físicas adequadas para uso como materiais de sub-base de pavimentos permeáveis. No entanto, o C-EPS seria recomendado para uso em pavimentos com pouco ou nenhum tráfego devido à sua resistência à compressão relativamente baixa.

Anisah e Mulyono (2019) buscaram determinar as propriedades do concreto permeável com base nos ensaios de laboratório. O material utilizado tinha uma relação água/cimento variando de 0,27 a 0,34, agregados de vários tipos e tamanhos e superplastificantes. Os resultados mostraram uma diferença baixa de resistência à compressão, e que a permeabilidade ao usar agregado natural foi mais porosa em comparação com a pedra triturada.

O estudo de Silva (2018) realizou um comparativo de três blocos de concreto permeável de diferentes empresas, calculando a permeabilidade de cada material e comparando-os à permeabilidade do solo. Diante dos resultados obtidos, foi possível comprovar a eficácia dos blocos drenantes de concreto.

A pesquisa de Marques (2018) teve por finalidade analisar as propriedades mecânicas de diferentes traços de concreto (com uso de materiais alternativos, como o granulado de garrafa PET), e verificar quais as mudanças ocorridas na resistência e na permeabilidade através de alterações nos agregados miúdos dos traços e na compactação.

O trabalho de Vračević *et al.* (2018) avaliou a porosidade total, densidade, resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à abrasão e capacidade de absorção de ruído do tráfego em 7 diferentes misturas de concretos. O resultado encontrado constatou um aumento da porosidade e uma diminuição da resistência à compressão e à flexão simultaneamente, com o aumento da participação das frações de agregados graúdos.

Korat *et al.* (2018) analisaram 6 misturas de concretos permeáveis preparadas com 3 diferentes tipos de agregados, e 2 frações de agregados. Através dos testes realizados verificou-se que nenhuma das misturas atendeu aos parâmetros das propriedades mecânicas para utilização como pavimentos em regiões européias; enquanto que Girardi e Finocchiaro (2017) avaliaram o desempenho do concreto permeável utilizando 2 tipos diferentes de agregados (o basáltico e o reciclado). Os resultados encontrados mostraram que todos os concretos avaliados foram altamente permeáveis e que os concretos com agregados basálticos apresentaram resistência à compressão superior aos concretos com agregados reciclados.

Borst e Razzaghmanesh (2018), esse estudo refere-se ao monitoramento hidráulico de um pavimento em intertravado do estacionamento de 80 vagas construído atrás da escola *Seitz Elementary* (Kansas, EUA), em parceria da EPA com o EUA. Este estudo acompanhou o progresso do entupimento da seção do pavimento usando doze refletômetros de teor de água e três pluviômetros.

Marchioni, Becciu e Silva (2015) esta pesquisa relata que o uso de pavimento permeável no Brasil tem aumentado significativamente nos últimos anos, devido aos incentivos provenientes da implantação dos Planos Diretores de Drenagem Urbana nas cidades.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo está estruturado em 09 tópicos, sendo o primeiro referente ao delineamento teórico da pesquisa. Nos 8 tópicos seguintes serão descritas as etapas formuladas para a consecução dos objetivos: a revisão sistemática por método PRISMA, a caracterização da região de estudo, a apresentação das estruturas de pavimentos permeáveis analisadas, a caracterização dos materiais da estrutura do pavimento, o dimensionamento do pavimento, a execução das estruturas de pavimento (E1 e E2), a manutenção das estruturas de concreto permeável (E3 e E4), o monitoramento do lençol freático e a análise do desempenho das estruturas de pavimento permeável.

3.1 Delineamento da pesquisa

Este trabalho consiste numa pesquisa aplicada de natureza descritiva, que foi desenvolvida no intuito de analisar o desempenho de 04 diferentes tipos de estruturas de pavimentos permeáveis implantadas no estacionamento da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI – UPE).

A revisão bibliográfica foi desenvolvida com base em consultas a artigos de periódicos e eventos científicos nacionais e internacionais, livros, dissertações, manuais, leis, sites e normas técnicas.

3.2 Caracterização da região de estudo

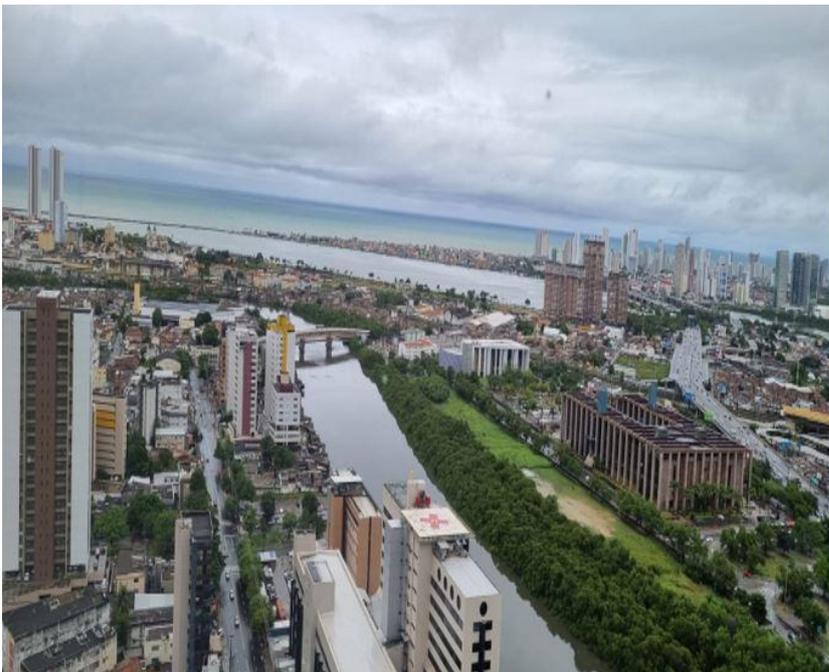
3.2.1 Localização

O Recife é uma cidade implantada dentro de um estuário, que está localizada no estado de Pernambuco, no setor oriental da Região Nordeste do Brasil. É a maior área urbana do estado, banhada a leste pelo Oceano Atlântico e limitada pelos municípios de Olinda, Paulista, Camaragibe, Cabo de Santo Agostinho, Jaboatão dos Guararapes e São Lourenço da Mata.

A cidade está situada sobre uma planície aluvional (fluviomarinha), constituída por ilhas, penínsulas, alagados e manguezais envolvidos por cinco rios: Beberibe, Capibaribe, Tejipió

braços do Jaboatão e do Pirapama, conferindo-lhe características peculiares. Essa planície é circundada por colinas em arco que se estendem do norte ao sul, de Olinda até Jaboatão. A Figura 31 apresenta o fluxograma de todo o processo de seleção que foi desenvolvido.

Figura 31 - Recife: cidade intercortada pelos rios.



Fonte: Autora (2021).

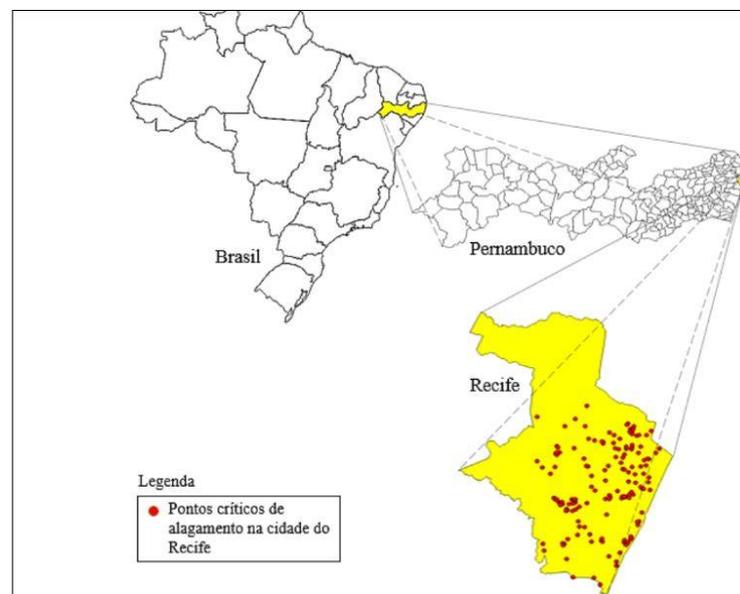
Do ponto de vista geológico, a cidade do Recife é caracterizada como uma planície e sofre grandes riscos de inundação, visto estar em ambiente susceptível às variações de maré, possuir lençóis freáticos muito próximos à superfície e, por ser região costeira, está submetida a constantes chuvas, além de possuir baixas cotas altimétricas, particularidades estas que naturalmente dificultam o processo de drenagem (CABRAL e ALENCAR, 2005; SANTOS *et al.*, 2019).

O manual de drenagem e manejo das águas pluviais do Recife, especifica que o subsolo da planície é de formação aluvionar, onde se intercalam camadas de areia e argila, que variam do tipo orgânicas até aquelas, produtos do intemperismo nas rochas das colinas. Nestas últimas, o subsolo é do grupo barreiras, sendo composto de argila-arenosa, de consistência dura, que se comporta, ao norte, mais sujeita aos deslizamentos quando saturadas pela água, e ao sul, mais friáveis ou propensas a aberturas de grandes voçorocas (RECIFE, 2016).

A presença dos materiais que compõem o subsolo da cidade do Recife, pode ser nitidamente ratificada pelo estudo de Prospecção Geotécnica realizado no prédio IAUPE. O Perfil geotécnico apresentado (ANEXO 1) contempla a execução de 4 furos de sondagem à percussão (SPT) realizados até uma profundidade máxima de 38 m. Os furos foram executados em Junho/2013, com o nível d'água variando de 1,10 m a 3,90 m, e apresentando as seguintes camadas: aterro de areia com restos de construção, areia argilosa com matéria orgânica, areia fofa a pouco compacta, argila orgânica siltosa de muito mole a mole e areia compacta a muito compacta.

De acordo com os dados do IBGE (2020), Recife tem uma área territorial de 218,843 km², e uma população estimada de 1.653.461 habitantes. Percebe-se que o processo de urbanização da cidade é cada vez mais crescente e desordenado, e isto tem ocasionado um aumento da impermeabilização e contribuído para a ocorrência de inundações. Segundo o levantamento apontado pela Emlurb (2013), a cidade do Recife tem 159 pontos críticos de alagamentos cadastrados (Figura 32).

Figura 32 - Localização dos pontos de alagamentos no Recife.



Fonte: Parisi (2019).

A região escolhida para estudo (Figura 33) foi a Escola Politécnica de Pernambuco (POLI – UPE), que está entre os pontos críticos de alagamentos, e situa-se no bairro da Madalena, Recife-PE.

Figura 33 - Mapa de situação da (POLI - UPE).



Fonte: Adaptada de Google Earth (2021).

De acordo com Silva (2018), entre os anos de 2002 e 2016 verifica-se que cerca de 32% da área dos 03 bairros que delimitam a Rua Prof. Benedito Monteiro foi impermeabilizada, e como consequência disto, houve um aumento considerável do escoamento superficial e da frequência de alagamentos na região (Figura 34).

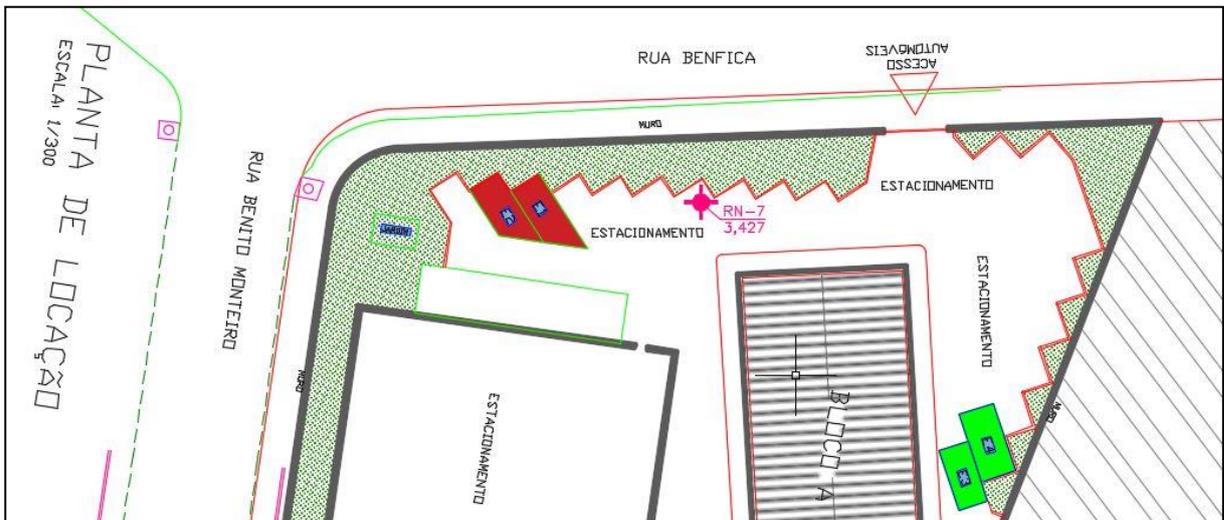
Figura 34 - Alagamento no estacionamento da (POLI - UPE).



Fonte: Autora (2021).

Segundo Almeida (2017), a área de terreno da POLI-UPE corresponde a 8.563,36 m². Neste trecho foram analisadas 4 vagas (Figura 35) que correspondem às áreas de estacionamento experimentais, nas quais foram construídas as estruturas de pavimentos permeáveis, com área aproximada de 50 m².

Figura 35 - Locação das pistas experimentais (E1, E2, E3 e E4) no estacionamento da POLI – UPE.



Fonte: Autora (2021).

O estudo de Silva (2018) avaliou o impacto da diminuição do pico de chuva na redução dos alagamentos locais, através de simulações com a implantação de pavimentos permeáveis. Verificou-se que, para um determinado evento de chuva ocorrido no dia 09 de Maio de 2016, houve uma redução de 84,00 % do volume total acumulado comparando o cenário da rede obstruída com a rede desobstruída aplicando pavimento permeável. Enquanto que, para a chuva do dia 30 de Maio de 2016, houve uma redução de 67,54 % do volume total acumulado. Este fato ressalta a eficiência da implantação do pavimento permeável no estacionamento da POLI/UPE.

No intuito de aprofundar o conhecimento técnico sobre as características da região de estudo, foi necessária a realização do levantamento topográfico, de ensaio para caracterização do solo, da chuva de projeto e do estudo de tráfego.

3.2.2 Levantamento topográfico

Baseando-se na planta baixa da POLI (UPE) fornecida pela PROADMI (Pró-Reitoria de Administração e Finanças), situada na Reitoria da UPE, foi realizado um levantamento topográfico (Figura 36), com o auxílio da estação total (Modelo Nikon DTM 322).

Figura 36 - Levantamento topográfico do estacionamento da POLI – UPE.



Fonte: Autora (2020).

A referência de nível do levantamento tomou como base o RN 393Y, do IBGE, com cota 2,2398, situado na calçada, à esquerda de quem entra no portão principal do Clube Internacional do Recife, na Rua Benfica Nº 505, Praça Euclides da Cunha, no bairro da Madalena. A partir deste foi realizado o transporte de cotas para a área de estudo e demarcado o (RN 7), de cota 3,427, localizado próximo às estruturas 1 e 2 do estacionamento, e foi realizado o levantamento dos demais pontos do estacionamento. Inicialmente, no levantamento foram verificadas as ocorrências de árvores, edificações, meios-fios e passeios, que compuseram uma planta baixa (Apêndice A). Em seguida, após a implantação das estruturas de pavimento (E1 e E2), foi realizada a locação das mesmas na área de estacionamento (Figura 37).

Figura 37 - Locação das estruturas de pavimento – E1 e E2 (POLI - UPE).



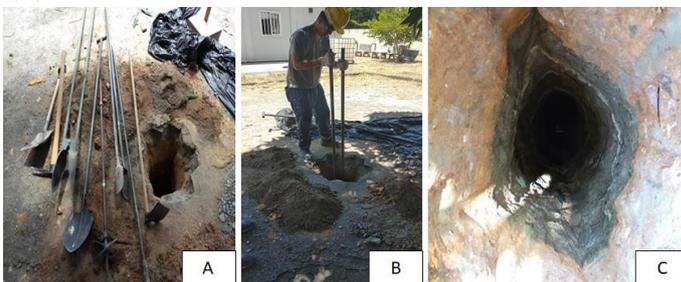
Fonte: Autora (2021).

3.2.3 Ensaios para caracterização do solo

3.2.3.1 Estudo geotécnico

Foi realizada uma sondagem (Figura 38) com auxílio da pá e picareta e do trado tipo concha até a identificação da profundidade do nível d'água, em Dezembro/2019. A locação do furo de sondagem está sendo apresentada na planta baixa da POLI (Apêndice A).

Figura 38 - Estudo geotécnico: equipamentos utilizados (A), execução do furo de sondagem (B) e furo (C).



Fonte: Autora (2021).

A partir do perfil geotécnico (Figura 39), foi possível analisar preliminarmente os materiais que compõem o solo existente do terreno da POLI-UPE, a diferentes profundidades. O perfil denota a existência de um pavimento existente (intertravado sextavado), seguido de um colchão de areia fina, e por camadas de argila arenosa amarelada, areia argilosa avermelhada, areia grossa cinza clara (RCC), areia média avermelhada e areia média cinza clara. Estes materiais encontrados nas camadas estão coerentes com o Perfil Geotécnico apresentado para o Prédio IAUPE (ANEXO 1). Com relação ao lençol freático, o mesmo foi encontrado a 1,75 m da superfície e, portanto não influencia no comportamento do pavimento.

Figura 39 - Perfil Geotécnico (POLI - UPE) realizado em 11/12/19.

Perfuração: TC-Trado Concha		Coordenadas: N 9.108.707,94 m; E 290.242,17 m; F 25S; SIRGAS2000	
N.A.	Rev. / Perf. (m)	Prof. (m)	Classificação do Material
Não medido	0,03	0,00	Pavimento existente (INTERTRAVADO)
	1,75	0,03	Areia fina, cor cinza clara
		0,11	Argila arenosa, cor amarela
		0,34	Areia argilosa, cor vermelha
		1,04	Areia média, cor cinza clara (RCC)
		1,33	Areia média, cor vermelha
		1,75	Areia média, cor cinza clara
		LIMITE DE SONDAGEM	
		Obs.: Lençol Freático a partir de 1,75m.	

Fonte: Autora (2021).

As amostras coletadas de solo foram encaminhadas para o laboratório da JOVEngenharia, onde foram submetidas aos ensaios discriminados na Tabela 12.

Tabela 12 - Ensaios para caracterização do solo.

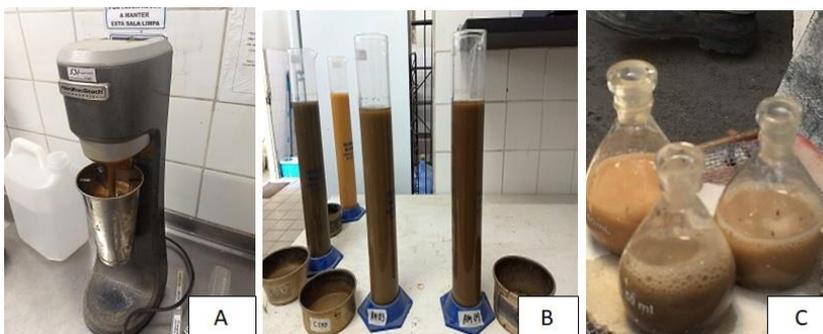
ENSAIOS	NORMA ABNT
Análise granulométrica	NBR 7181:2016
Determinação do limite de liquidez (LL)	NBR 6459:2017
Determinação do limite de plasticidade (LP)	NBR 7180:2016
Ensaio de compactação (GC)	NBR 7182:2020
Índice de Suporte Califórnia (ISC) - método de ensaio	NBR 9895:2017

Fonte: Autora (2021).

3.2.3.2 Análise granulométrica

Para a realização desse ensaio utilizou-se a ABNT NBR 7181 (2016), em que foi possível determinar a distribuição granulométrica do solo por sedimentação (Figura 40). Os materiais constituintes das camadas de solo foram classificados de acordo com o sistema *Transportation Research Board* (TRB).

Figura 40 - Ensaio de sedimentação: densímetro (A), amostras (B), picnômetro (C).



Fonte: Autora (2021).

3.2.3.3 Determinação do limite de liquidez e de plasticidade

Os limites de liquidez e de plasticidade (Figura 41) foram determinados conforme a metodologia estabelecida pela ABNT NBR 6459 (2017) e ABNT NBR 7180 (2016), respectivamente.

Figura 41 - Determinação do limite de liquidez e plasticidade: equipamentos (A) e amostra (B).



Fonte: Autora (2021).

3.2.3.4 Ensaio de compactação

O ensaio de compactação (Figura 42) foi empregado segundo a ABNT NBR 7182 (2020) e tem a finalidade de obter a densidade máxima e a umidade ótima do solo para a energia de compactação de Proctor Intermediário.

Figura 42 - Ensaio de compactação: moldagem do cilindro (A) e determinação da umidade (B).

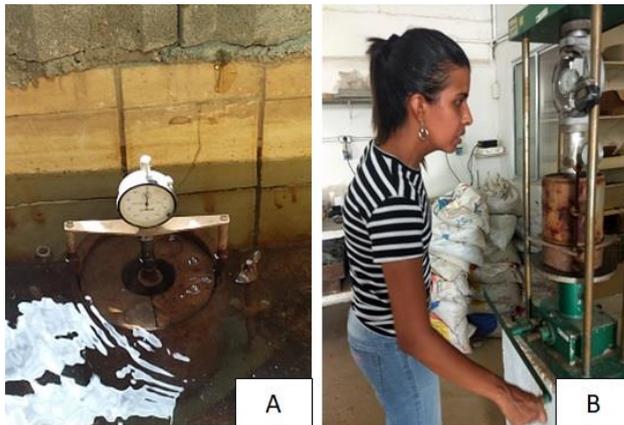


Fonte: Autora (2021).

3.2.3.5 Índice de suporte califórnia (ISC) - método de ensaio

O ensaio do Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou *California Bearing Ratio* (CBR) avaliou a resistência do material frente a deslocamentos significativos impostos por meio de penetração em laboratório (JIMENEZ, 2011). Para a realização do CBR (Figura 43) foi adotado o procedimento da ABNT NBR 9895 (2017).

Figura 43 - Determinação do CBR: cilindro submerso no tanque (A) e leitura na prensa (B).



Fonte: Autora (2021).

3.2.3.6 Verificação do grau de compactação do subleito

Na fase de execução das pistas experimentais (E1 e E2), foi verificado o grau de compactação (GC) do subleito *in loco*, através do ensaio para determinação da massa específica aparente do solo *in situ* (Figura 44), conforme prescrito na ABNT NBR 7185 (2016). Além disso, determinou-se a umidade com emprego do speedy, de acordo com o procedimento estabelecido pela norma DNER-ME 052/94.

Figura 44 - Determinação GC e da umidade do subleito.



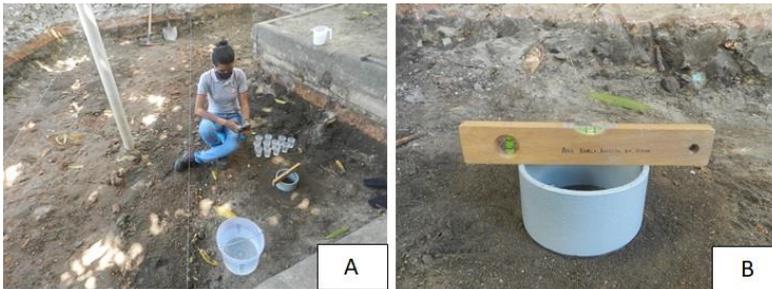
Fonte: Autora (2021).

3.2.3.7 Verificação da taxa de infiltração do subleito

Durante a etapa de execução das pistas experimentais (E1 e E2), foi verificada a taxa de infiltração em 3 pontos distintos da camada do subleito (Figura 45). Para tanto, foi utilizado o infiltrômetro de anel simples, que consiste num cilindro metálico de 15 cm de diâmetro e 10 cm de altura, que foi cravado a aproximadamente 1 cm no solo. Inicialmente, verteu-se um

volume de água conhecido (200 ml), o suficiente apenas para formar uma lâmina d'água na superfície do solo interior do infiltrômetro, e cronometrou-se o tempo de infiltração da água. Este procedimento foi repetido até que os intervalos de tempo de infiltração da água, entre um volume e outro, se tornassem constantes.

Figura 45 - Taxa de infiltração do subleito: ensaio em 03 pontos distintos (A) e infiltrômetro - anel simples (B).



Fonte: Autora (2021).

3.2.3.8 Determinação do coeficiente de permeabilidade do solo

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), a permeabilidade do subleito é um dado necessário para o dimensionamento hidráulico da estrutura do pavimento, e pode ser determinada através do coeficiente de permeabilidade do solo K (m/s). Para tanto, foi realizado o ensaio (Figura 46) no laboratório da UFPE, conforme a metodologia proposta pela ABNT NBR 13292 (2021). Tendo em vista a necessidade inicial de coletar dados do solo para auxiliar na concepção do projeto, foi determinado o coeficiente de permeabilidade do solo para as amostras referentes às camadas com profundidade de 0,6 m e 1,0 m.

Figura 46 - Ensaio de sedimentação: preparação do corpo de prova (A) e saturação do corpo de prova (B).



Fonte: Autora (2021).

O cálculo do coeficiente de permeabilidade foi baseado na Lei de Darcy (Equação 7):

$$K = \frac{V \times L}{A \times h \times t} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

V = a quantidade de água que atravessa a amostra (cm³);

K = o coeficiente de permeabilidade (cm/s);

h = o desnível entre a superfície de entrada e de saída (cm);

A = seção da amostra de solo (cm²);

t = intervalo de tempo (s); e

L = a espessura da camada de solo, medida na direção do escoamento (cm)

3.2.4 Chuva de projeto

Paz (2004) afirma que a caracterização hidrológica de uma dada região normalmente é feita com base em dados relativos à precipitação máxima local. Essa precipitação máxima, segundo o autor, caracteriza-se como uma situação de precipitação extrema, distribuída criticamente em termos espaciais e temporais, em uma determinada bacia hidrográfica.

A intensidade, a duração e a frequência das chuvas são fatores determinantes para o dimensionamento apropriado de pavimentos em concreto permeável, já que além de resistir aos esforços mecânicos, estas estruturas precisam apresentar eficiência hidráulica, mitigando ou solucionando as altas taxas de escoamento superficial, inundações e alagamentos, problemas recorrentes em diversos centros urbanos (ALMEIDA, 2017).

Diante disto, foi realizada a coleta de dados pluviométricos de um evento de chuva ocorrido no dia 13/06/2019. Os referidos dados foram obtidos do site do CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), através das medições realizadas na estação pluviométrica localizada no bairro da Boa Vista, nas coordenadas 291611,94 E e 9107591,25 S, a uma distância de 2,30 km da região de estudo. De acordo com os dados levantados, verificou-se que neste dia 13/06/2019 ocorreu uma chuva extrema de 194,6 mm

em 24h, que provocou enormes alagamentos, transbordamento de rios e canais nas regiões metropolitanas de Recife e João Pessoa (Figura 47).

Figura 47 - Evento de chuva do dia 13/06/2019.



Fonte: CLIMATEMPO (2019).

Diante dos impactos dos alagamentos, bem como dos transtornos verificados na POLI/UPE e demais estabelecimentos de ensino em seu entorno, decidiu-se estudar este evento de chuva, no intuito de propor a implantação de pavimentos permeáveis como uma medida compensatória para atenuar os efeitos dos alagamentos na região.

O tempo de retorno da chuva foi calculado pela nova equação IDF do Recife (Equação 8), disponibilizada pela EMLURB, através do Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais do Recife.

$$i = \frac{611,3425 \times Tr^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo:

i = intensidade de chuva (mm/h);

Tr = Tempo de retorno (anos); e

t = Duração da chuva (min).

3.2.5 *Estudo de tráfego*

O objetivo do estudo de tráfego é obter, através de métodos sistemáticos de coleta, dados relativos aos cinco elementos fundamentais do tráfego (motorista, pedestre, veículo, via e meio ambiente) e seu inter-relacionamento (DNIT, 2006). De acordo com os dados fornecidos pelo Departamento de Recursos Humanos da POLI/UPE, verificou-se que o quantitativo de docentes e funcionários administrativos é de aproximadamente 243 pessoas. Além disso, verificou-se que a quantidade de vagas do estacionamento é de 101. A Figura 48 mostra o estacionamento da POLI no dia 05.12.2019, onde o fluxo de veículos foi intenso.

Figura 48 - Estacionamento da POLI no dia 05/12/2019.



Fonte: Autora (2019).

3.3 **Dimensionamento do pavimento**

Diante dos estudos básicos apresentados para a região, foi realizado o dimensionamento mecânico e hidráulico das estruturas (E1 e E2) dos pavimentos permeáveis.

3.3.1 *Dimensionamento mecânico*

Este dimensionamento foi embasado na metodologia da Instrução de Projeto (IP-06/2004) do município de São Paulo, que por sua vez, é preconizada pela ABCP, e teve como elementos básicos os estudos geotécnicos do subleito, bem como os dados do estudo de tráfego.

- *Revestimento da pista*: foi concebido em blocos de concreto pré-moldados (pavimento intertravado permeável), com espessura determinada em função do dimensionamento; e
- *Base*: foi concebida em brita graduada 12,5 mm reciclada e convencional 25 mm, com espessura determinada em função do dimensionamento.

A espessura da camada de revestimento em intertravado foi obtida por meio das especificações da norma ABNT NBR 16416 (2015) e da IP-06 (2004), considerando que o revestimento de peça de concreto permeável foi implantado numa área de tráfego leve.

3.3.2 Dimensionamento hidráulico

Em função do coeficiente de permeabilidade do subleito ($1,72 \times 10^{-4}$ m/s), foi definido o sistema de infiltração total. A determinação da espessura da camada de reservatório do pavimento baseou-se na metodologia prescrita no estudo de Antunes (2017), através da equação 6. No entanto, também foi realizado um comparativo com o dimensionamento realizado através do método da Curva envelope e da metodologia estabelecida pela ABNT NBR 16416 (2015).

No intuito de definir a área de contribuição, fez-se necessário a delimitação das bacias e sub-bacias de contribuição do estacionamento da POLI/UE. Para tanto, adotou-se a metodologia utilizada no estudo de SILVA (2018), que engloba a análise das curvas de níveis, do MDT (Modelo Digital de Terreno).

3.4 Apresentação das estruturas de pavimentos permeáveis analisadas

A estrutura proposta para o pavimento permeável implantado foi concebida com base nas premissas básicas utilizadas no dimensionamento, e também considerando o período de precipitação da época de implantação. De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), as estruturas de pavimentos permeáveis correspondem a combinação das camadas de base, revestimento e assentamento permeável, dimensionadas para suportar o carregamento do tráfego, distribuir os esforços no subleito e permitir a percolação de água. Nesta pesquisa foram analisadas 04 diferentes tipos de estruturas de pavimentos permeáveis (Tabela 13).

Tabela 13 - Estruturas de pavimento permeável analisadas.

ESTRUTURAS	MATERIAIS CONSTITUINTES
E1	Revestimento em peça de concreto permeável e base composta por brita reciclada de dimensão máxima de 12,5 mm.
E2	Revestimento em peça de concreto permeável e base composta por brita convencional de dimensão máxima de 25 mm.
E3	Revestimento em concreto permeável com camadas de base/sub-base compostas por brita reciclada de dimensão máxima de 19 mm e subleito com substituição parcial por areia grossa reciclada.
E4	Revestimento em concreto permeável com camadas de base/sub-base compostas por brita reciclada de dimensão máxima de 19 mm.

Fonte: A autora (2021).

A Figura 49 apresenta as estruturas E1 e E2, com revestimento em intertravado permeável, enquanto que a Figura 50 mostra as estruturas E3 e E4, com revestimento em concreto permeável, implantadas por Almeida (2016).

Figura 49 - Estruturas em intertravado permeável (E1 e E2).



Fonte: Autora (2021).

Figura 50 - Estruturas em concreto permeável (E3 e E4).



Fonte: Autora (2021).

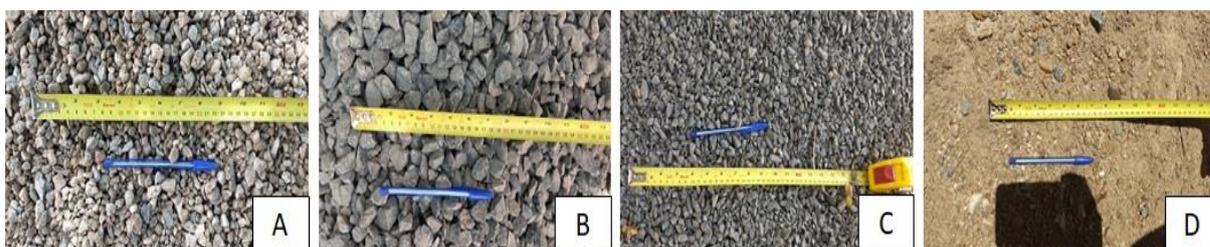
3.5 Caracterização dos materiais das estruturas (E1 e E2) do pavimento

A caracterização dos materiais foi realizada com base nos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015).

3.5.1 Camadas de base/assentamento e rejuntamento

A Figura 51 apresenta os materiais utilizados nas camadas constituintes das estruturas de pavimentos permeáveis (E1 e E2): camada de base (brita reciclada e convencional), camada de assentamento (pedrisco) e rejuntamento (areia grossa).

Figura 51 - Materiais utilizados nas estruturas (E1 e E2) do pavimento.



Fonte: Autora (2021).

Estes materiais foram submetidos à análise granulométrica (Figura 52), de acordo com o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 7181 (2016), e verificação de conformidade com os requisitos da ABNT NBR 16416 (2015).

Figura 52 - Análise granulométrica dos materiais: quarteamento da amostra (A), seleção de peneiras (B), granulometria (C).



Fonte: Autora (2021).

Além da distribuição granulométrica foram avaliadas as propriedades dos materiais constituintes das estruturas de pavimento apresentadas na Tabela 14. A verificação de conformidade dos materiais foi realizada com base nos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015).

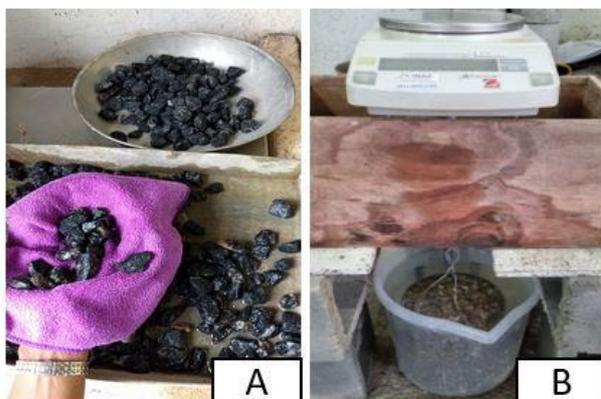
Tabela 14 - Propriedades dos materiais constituintes das estruturas do pavimento.

ENSAIOS	NORMAS ABNT
Massa específica (ρ_s)	NBR 6458:2017
Massa específica aparente (ρ_{aps})	NBR 6458:2017
Absorção de água (A_a)	NBR 6458:2017
Abrasão Los Angeles (P)	NBR 16974:2021
Índice do volume de vazios (E_v)	NBR 16972:2021

Fonte: Autora (2021).

O ensaio para determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água dos agregados utilizados na camada de base (brita reciclada e brita convencional), foi realizado de acordo com o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 6458 (2017). A Figura 53 mostra as etapas do ensaio.

Figura 53 - Determinação da absorção de água dos agregados: remoção da água superficial (A), pesagem do material saturado (B).



Fonte: Autora (2021).

O valor da massa específica (ρ_s) é obtido através da (Equação 9):

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_s - M_i} \times \rho_w \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

M_s = massa da amostra seca em estufa (g);

M_i = massa da amostra imersa em água destilada (g); e

ρ_w = massa específica da água à temperatura T do ensaio.

O valor da massa específica aparente (ρ_{aps}) é obtido através da (Equação 10):

$$\rho_{aps} = \frac{M_s}{M_{Sat} - M_i} \times \rho_w \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

M_s = massa da amostra seca em estufa (g);

M_{Sat} = massa da amostra saturada, superficialmente seca (g);

M_i = massa da amostra imersa em água destilada (g); e

ρ_w = massa específica da água à temperatura T do ensaio.

O valor da absorção de água (A_a) é obtido através da (Equação 11):

$$A_a = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

m_1 = massa seca (kg); e

m_2 = massa úmida do corpo de prova (kg).

A Figura 54 mostra o ensaio de Abrasão Los Angeles, conforme procedimento estabelecido pela ABNT NBR 16974 (2021).

Figura 54 - Determinação da abrasão los angeles.



Fonte: Autora (2021).

A determinação de perda por Abrasão Los Angeles é calculada através da (Equação 12):

$$P = \frac{(M - M_1)}{M} \times 100 \quad \text{(Equação 12)}$$

P = Perda por abrasão em porcentagem;

M = Massa do material seco retido na peneira nº 12; e

M_1 = Massa do material passante na peneira nº 12.

A Figura 55 mostra as etapas do ensaio de índice do volume de vazios (E_v), conforme procedimento estabelecido pela ABNT NBR 16972 (2021).

Figura 55 - Determinação do índice do volume de vazios (E_v): Compactação do material (A e B) e Pesagem (C).



Fonte: Autora (2021).

O valor do índice do volume de vazios (E_v) é obtido através da (Equação 13):

$$E_v = \frac{100 [(d_1 \times \rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1 \times \rho_w} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

E_v = índice do volume de vazios (%);

d_1 = massa específica relativa do agregado seco (Kg);

ρ_w = massa específica da água (Kg/m³); e

ρ_{ap} = massa unitária do agregado no estado compactado (Kg/m³).

3.5.2 Manta geotêxtil bidim

Tendo em vista que o sistema de infiltração adotado para as estruturas de pavimento foi de infiltração total, foi necessário a utilização de uma manta geossintética do tipo não-tecido R-16 (Figura 56), entre a parte inferior da base do pavimento e o subleito. A manta foi fornecida por um fabricante local, e utilizada no intuito de evitar a colmatação da estrutura, devido à penetração de finos provenientes do solo do subleito na camada de base.

Figura 56 - Manta geotêxtil do tipo não-tecido R-16.



Fonte: Autora (2021).

3.5.3 Peças de intertravado permeável

Nas estruturas de pavimento permeável (E1 e E2) foi utilizado como revestimento as peças de intertravado permeável retangulares, nas dimensões (20 x 10 x 8) cm (comprimento, largura e espessura). Os lotes de peças foram fornecidos por um fabricante local e foram submetidos a uma inspeção visual no intuito de identificar defeitos que viessem a prejudicar o assentamento, o desempenho estrutural ou a estética do pavimento. Além disso, foi realizada a verificação de conformidade das peças, considerando as propriedades apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 -Propriedades para verificação de conformidade das peças de intertravado permeável.

PROPRIEDADES	NORMAS ABNT
Inspeção visual	NBR 9781:2013
Avaliação dimensional	NBR 9781:2013
Absorção de água (A)	NBR 9781:2013
Resistência à compressão simples	NBR 5739:2018
Coefficiente de permeabilidade (K)	NBR 16416:2015

Fonte: Autora (2021).

3.6 Execução das estruturas de pavimento (E1 e E2)

A execução das estruturas de pavimento intertravado permeável foi realizada conforme a metodologia construtiva apresentada pela ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) que, por sua vez, compatibiliza os procedimentos utilizados no sistema de pavimentação

convencional (não permeável) da ABNT NBR 15953 (2011), com as especificações da ABNT NBR 16416 (2015).

3.7 Manutenção das estruturas de concreto permeável

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), o pavimento permeável deve sofrer intervenções de manutenção sempre que existirem condições que comprometam o desempenho mecânico ou hidráulico do pavimento. Além disso, quando os pavimentos permeáveis apresentam coeficiente de permeabilidade $\geq 10^{-5}$ m/s, deve-se realizar ações de limpeza.

Dessa forma, foram aplicadas técnicas de manutenção nas estruturas de pavimento com revestimento em concreto permeável implantadas por Almeida (2017), no intuito de recuperar a capacidade de permeabilidade do pavimento.

3.8 Monitoramento do lençol freático

Os pavimentos permeáveis são constituídos por camadas que funcionam como reservatórios, permitindo a percolação das águas entre as camadas. No intuito de verificar a capacidade de permeabilidade das estruturas de pavimentos, foi realizado um monitoramento do nível do lençol freático na área de estudo. Para tanto, foram implantados 6 (Seis) piezômetros (tubos de PVC $\varnothing 100$ mm) no entorno do estacionamento da POLI/UPE. A Figura 57 mostra a implantação dos piezômetros na região de estudo.

Figura 57 - Implantação de piezômetros no estacionamento da POLI/UPE: P1 (A), P2(B), P3 (C), A1(D), A2 (E), P4 (F).



Fonte: Autora (2021).

3.9 Análise do desempenho das estruturas de pavimentos permeáveis

O desempenho das estruturas de pavimentos permeáveis foi analisado através da determinação do coeficiente de permeabilidade das estruturas do pavimento, no intuito de avaliar a permeabilidade do mesmo. Para tanto, foi adotada a metodologia proposta pela ABNT NBR 16416 (2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através da análise do desempenho das estruturas de pavimentos permeáveis, espera-se poder determinar qual a estrutura de pavimento implantada que apresenta a maior eficiência, considerando a capacidade de permeabilidade e as propriedades físicas e mecânicas das estruturas analisadas. Diante desse contexto, vêm sendo desenvolvidos estudos no intuito de analisar a eficiência do pavimento permeável e implantar melhorias técnicas.

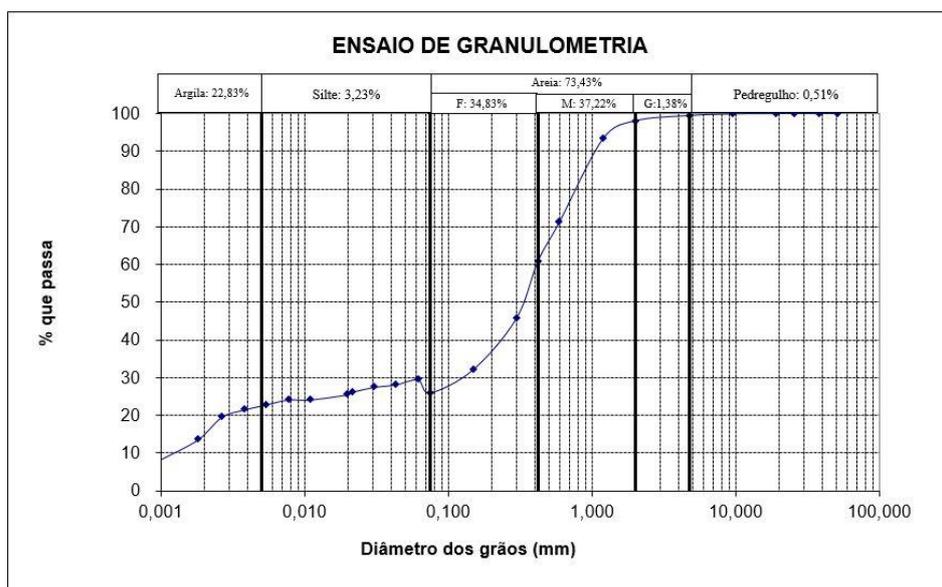
4.1 Caracterização da região de estudo

A região escolhida para estudo (estacionamento da POLI/UPE) foi analisada quanto aos aspectos topográficos, geotécnicos, hidrológicos e de tráfego.

4.1.1 Estudo geotécnico e análise granulométrica

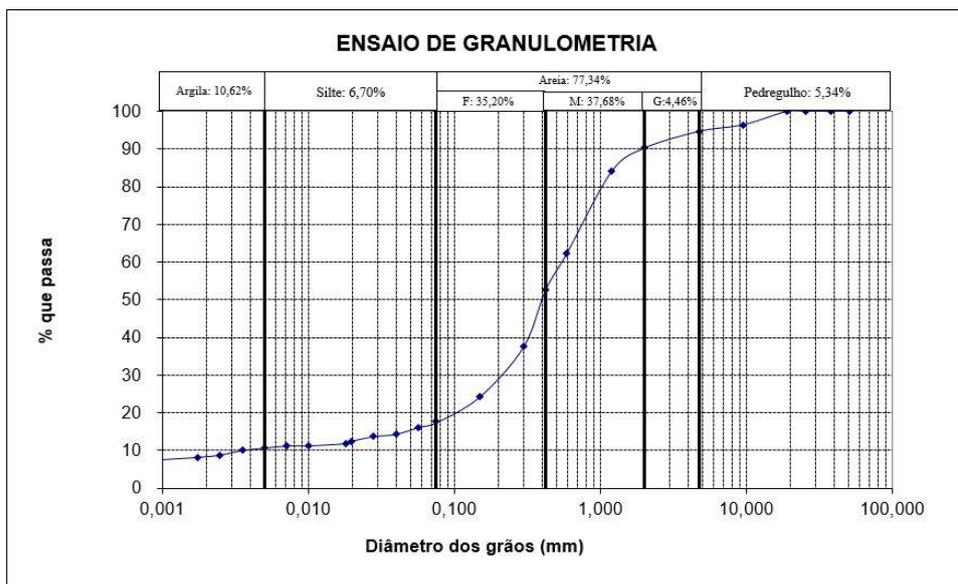
De acordo com a ordem das camadas apresentadas pelo Perfil Geotécnico, foram obtidas as curvas granulométricas para as camadas de areia argilosa avermelhada (Amostra 1- Figura 58), areia média cinza clara - RCC (Amostra 2 - Figura 59), areia média avermelhada (Amostra 3 - Figura 60) e areia média cinza clara (Amostra 4 - Figura 61).

Figura 58 - Amostra 1: areia argilosa avermelhada.



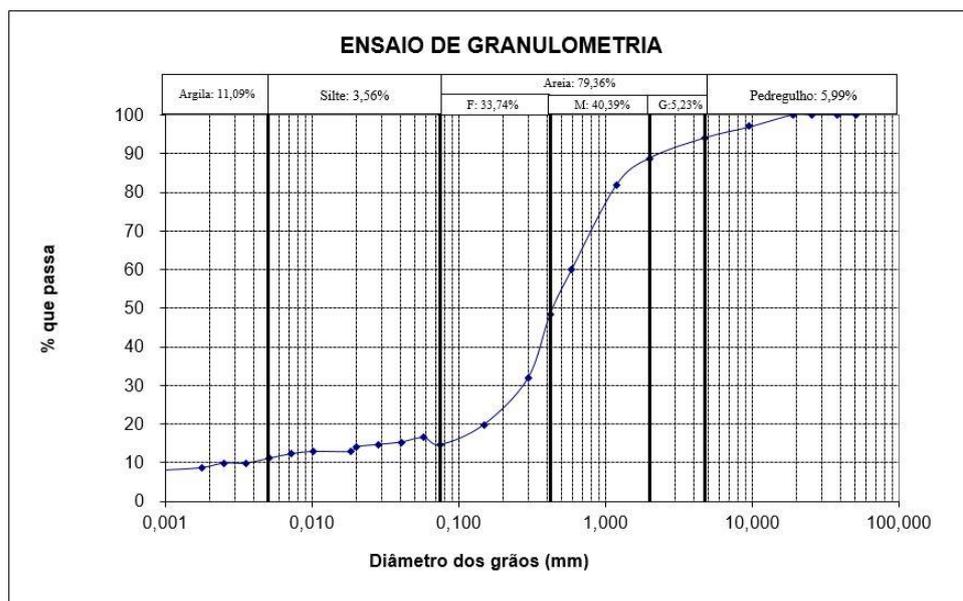
Fonte: Autora (2021).

Figura 59 - Amostra 2: areia média cinza clara – RCC.



Fonte: Autora (2021).

Figura 60 - Amostra 3: areia média avermelhada.



Fonte: Autora (2021).

Os estudos geotécnicos realizados definiram a classificação do solo (Tabela 17) das camadas apresentadas no perfil geotécnico, através do sistema de classificação TRB (*Transportation Research Board*).

Tabela 17 - Classificação do solo pelo sistema TRB.

AMOSTRA	PROFUNDIDADE DA CAMADA (cm)	MATERIAL	CLASSIFICAÇÃO (SISTEMA TRB)
1	34	Areia argilosa avermelhada	A-2-4
2	104	Areia média cinza clara - RCC	A-2
3	133	Areia média avermelhada	A-2
4	175	Areia média cinza clara	A-2

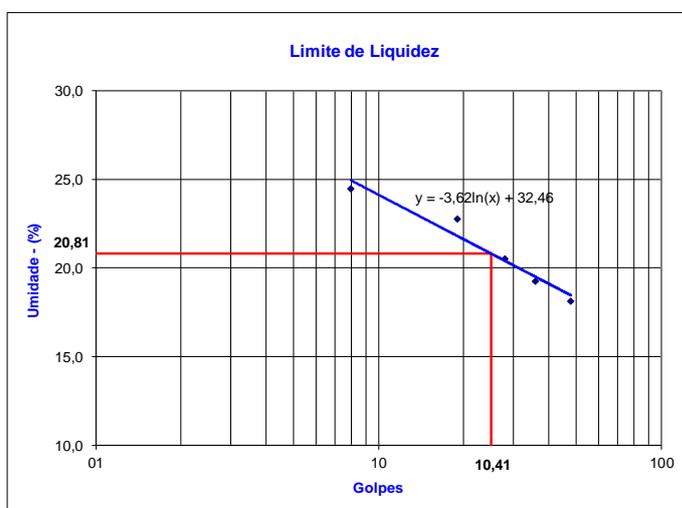
Fonte: Autora (2021).

Dessa forma, pode-se dizer que os solos das amostras analisadas são compostos por materiais pedregulhosos, ou areias siltosos ou argilosos, e que como subleito apresentam-se com um comportamento classificado de excelente a bom.

4.1.2 Determinação dos limites de liquidez e plasticidade

Foram determinados os limites de liquidez e de plasticidade da Amostra 1 apresentando valores de 20,8 % e 13,0 %, respectivamente, e I.P = 7,8 %. Dessa forma, pode-se dizer que o material apresentou baixo teor de plasticidade (Figura 62).

Figura 62 - Limite de liquidez da Amostra 1.



Fonte: Autora (2021).

Diante da baixa plasticidade dos materiais encontrados nas demais camadas do solo (Figura 63), os mesmos foram classificados como NL (Não Líquido) e NP (Não Plástico).

Figura 63 - Determinação dos limites LL e LP da Amostra 2: aparelho Casagrande (A) e amostra NL/NP (B).



Fonte: Autora (2021).

4.1.3 Caracterização do solo da camada do subleito

No intuito de caracterizar a camada de subleito (profundidade de 60 cm) foram realizados ensaios em laboratório e *in loco* (Tabela 18).

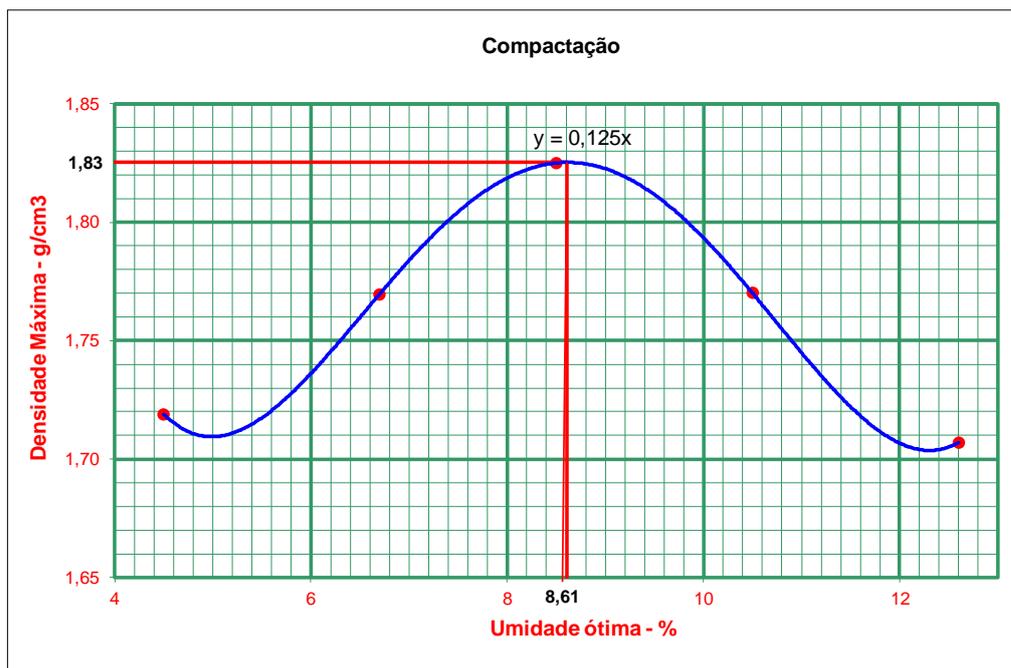
Tabela 18 - Ensaio para caracterização da camada do subleito.

ENSAIO	LOCAL
Compactação	Laboratório da JOV Engenharia
Índice de Suporte Califórnia (ISC)	Laboratório da JOV Engenharia
Massa específica aparente	<i>In loco</i>
Taxa de infiltração do subleito	<i>In loco</i>
Coefficiente de permeabilidade	<i>In loco</i>

Fonte: Autora (2021).

Para a execução do ensaio de compactação foi utilizada a energia de Proctor Intermediária, sendo essa escolha feita em função do uso que foi dado ao material analisado (subleito). O material apresentou uma densidade máxima de 1,83 g/cm³ e umidade ótima de 8,61 % para a camada de subleito (Figura 64).

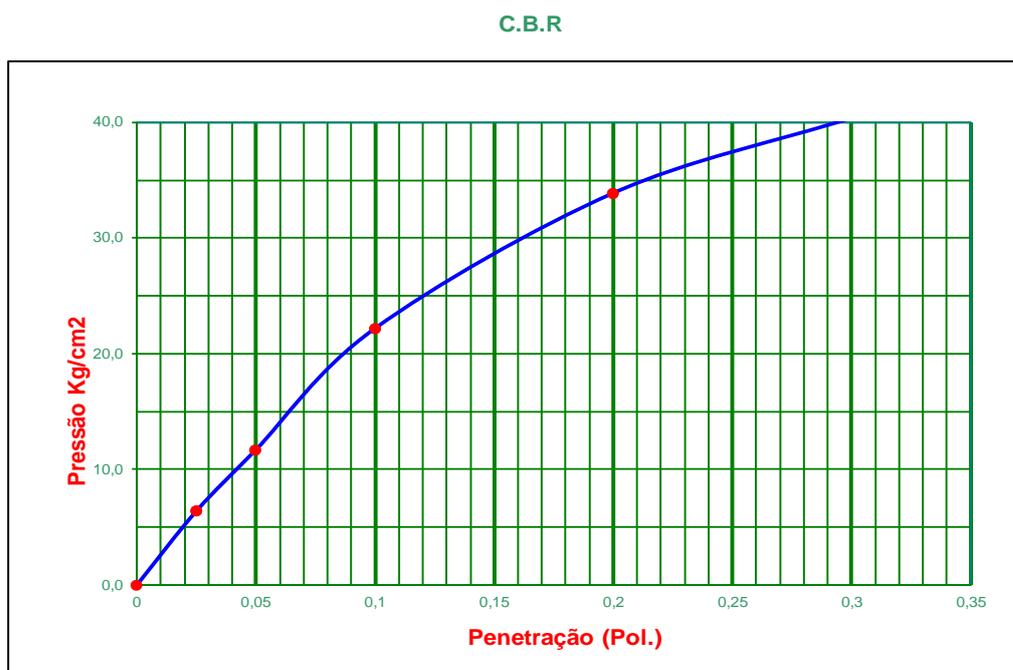
Figura 64 - Compactação da camada de subleito.



Fonte: Autora (2021).

A Figura 65 apresenta o Índice de Suporte Califórnia (CBR) de 32 % encontrado para a referida camada.

Figura 65 - Determinação do CBR do subleito.



Fonte: Autora (2021).

No que diz respeito ao grau de compactação da camada, verificado *in loco*, a Tabela 19, apresenta os resultados dos ensaios realizados em 3 pontos distintos da camada de subleito.

Tabela 19 - Grau de compactação e umidade da camada de subleito.

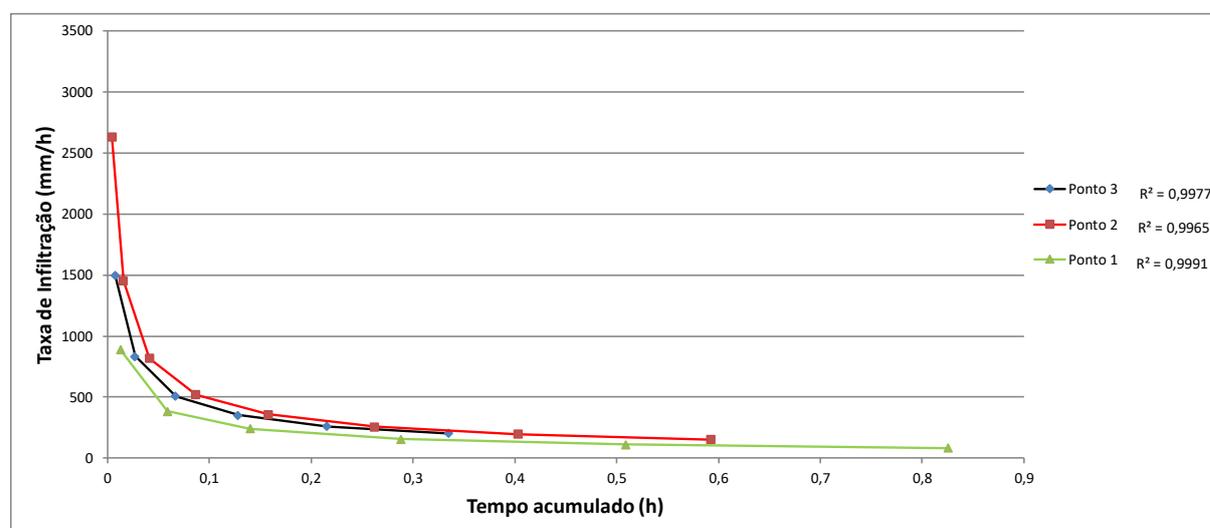
FURO	GRAU DE COMPACTAÇÃO (%)	UMIDADE ÓTIMA (%)
1	87,60	8,5
2	90,79	8,5
3	92,43	8,5

Fonte: Autora (2021).

Vale salientar que a ACI 522 R (2010) recomenda que a compactação do subleito seja a mínima possível e corresponda a 90 % da densidade seca máxima, obtida através do ensaio de proctor normal, de forma que o solo resista aos esforços mecânicos aos quais é submetido, e mantenha um percentual de vazios, permitindo a passagem da água por sua estrutura.

Ainda durante a fase de execução foi verificada a taxa de infiltração do subleito. A Figura 66 mostra o gráfico com as curvas de capacidade de infiltração resultantes dos 03 pontos ensaiados, definindo o comportamento da taxa de infiltração em função do tempo de realização do ensaio, e os índices de correlação (R^2) de cada curva.

Figura 66 - Curvas de infiltração nos pontos ensaiados.



Fonte: Autora (2021).

Diante dos resultados expostos nas curvas de infiltração, verifica-se que o solo da região é bastante arenoso, e por isso, apresenta elevadas taxas de infiltração que, conforme os valores médios identificados para cada ponto ensaiado, variam de 310,59 mm/h a 798,64 mm/h. Verifica-se que, de acordo com os requisitos da ABNT NBR 16416 (2015) para o coeficiente de permeabilidade, o solo estudado apresenta um grau de permeabilidade médio.

Entretanto, no intuito de verificar a permeabilidade do solo, conforme a recomendação prescrita pela ABNT NBR 16416 (2015), foi determinado *in loco* o coeficiente de permeabilidade do solo do subleito (K). A Tabela 20, mostra os resultados dos coeficientes encontrados para as camadas ensaiadas.

Tabela 20 - Coeficientes de permeabilidade do subleito (k).

AMOSTRAS	PROFUNDIDADE DA CAMADA (m)	K (m/s)
1	0,60 (Subleito)	$1,72 \times 10^{-4}$
2	1,00	$1,69 \times 10^{-5}$

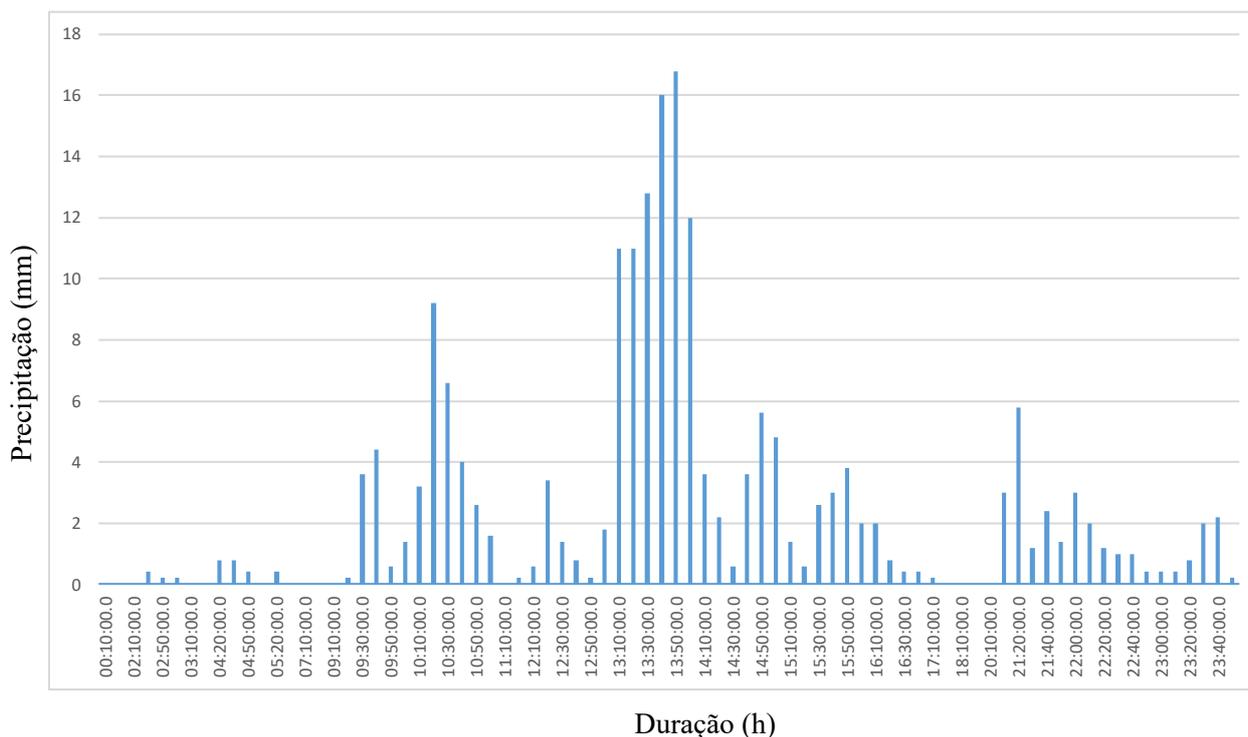
Fonte: Autora (2021).

Dessa forma, pode-se concluir que o solo apresenta um grau de permeabilidade médio (10^{-3} a 10^{-5} m/s), e portanto, o sistema de infiltração recomendado pela ABNT NBR 16416 (2015) seria o de infiltração parcial ou sem infiltração. Entretanto, considerando que o coeficiente de permeabilidade do solo determinado para a amostra 2 foi de $1,69 \times 10^{-5}$ m/s, e baseando-se no princípio da ACI 522 R (2010) que indica o coeficiente mínimo (k) de permeabilidade do solo de $3,6 \times 10^{-6}$ m/s em sistemas de infiltração total, desde que este solo se estenda até uma profundidade mínima de 1,20 m da cota de superfície, foi adotado o sistema de infiltração total.

4.2 Chuva de projeto

Os dados da chuva de projeto foram obtidos do pluviômetro do CEMADEN, localizado na estação Boa Vista. A Figura 67 apresenta o hietograma de precipitação para o evento ocorrido no dia 13.06.2019.

Figura 67 - Precipitação no dia 13.06.2019.



Fonte: Autora (2021).

Este evento apresentou uma duração de 24 horas, e um total de 194,60 mm de precipitação, com um tempo de retorno de 5 anos, calculado pela equação da IDF da cidade do Recife.

$$i = \frac{611,3425 \times Tr^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \therefore (194,60 \text{ mm}/24 \text{ h}) = \frac{611,3425 \times Tr^{0,1671}}{(1440 \text{ min} + 7,3069)^{0,6348}} \therefore$$

$$11,3425 \times Tr^{0,1671} = 822,69 \therefore Tr = 5 \text{ anos}$$

4.3 Estudo de tráfego

De acordo com os dados fornecidos pelo Departamento de Recursos Humanos da POLI/UPE e pelo quantitativo de vagas existentes no estacionamento, pode-se induzir que o fluxo de veículos na região de estudo, corresponde a cerca de 90 % de veículos de passeios e 10 % de veículos utilitários. A região é caracterizada como uma área de tráfego leve, tendo em vista que o Volume Diário Médio (VDM) de veículos é inferior a 400 veículos, conforme especificação da ABNT NBR 16416 (2015).

4.4 Dimensionamento das estruturas do pavimento

Para o dimensionamento mecânico e hidráulico foram adotados os parâmetros obtidos pelos ensaios realizados com o solo do subleito (Tabela 21).

Tabela 21 – Resultados dos ensaios realizados com o solo do subleito.

ENSAIOS	RESULTADOS
Sondagem à Pá e picareta e a Trado	Classificado pelo sistema TRB como A-2 e A-2-4
Análise granulométrica	Solo predominantemente arenoso e argiloso
Determinação do Limite de Liquidez (LL)	AM2 = NL
Determinação do Limite de Plasticidade (LP)	AM2 = NP
índice de plasticidade (IP)	IP = 0
Ensaio de compactação (Proctor Intermediário)	Densidade máxima = 1,83 g/cm ³
	Umidade ótima = 8,61 %
	Grau de compactação médio = 90,27 %
índice de suporte califórnia (ISC)	CBR = ISC = 32 %
Taxa de infiltração	Variando entre 310,59 mm/h e 798,64 mm/h
Coefficiente de permeabilidade do solo	1,72 x 10 ⁻⁴ m/s

Fonte: Autora (2021).

4.4.1 Dimensionamento mecânico

Em função do CBR (32 %) determinado para o subleito e do número de solicitações por eixo padrão para as áreas de tráfego leve ($N \leq 1,5 \times 10^6$), foi definida a espessura da camada de base baseando-se no procedimento A da IP - 06/2004. Dessa forma, a estrutura do pavimento em blocos intertravados permeáveis com vida útil estimada de 10 anos foi composta pelas seguintes camadas:

Revestimento em bloco intertravado	8 cm
Camada de assentamento (colchão de areia)	5 cm
Base em brita graduada	15 cm
Espessura total real	28 cm

Vale salientar que para as áreas de tráfego leve ($N \leq 1,5 \times 10^6$) não se faz necessário a implantação de sub-base. Além disso, para este tráfego leve a espessura recomendada para o bloco seria de apenas 6 cm, no entanto foi utilizado um bloco fornecido pelo fabricante local com espessura de 8 cm.

4.4.2 Dimensionamento hidráulico

O dimensionamento hidráulico foi realizado com base na Equação 6 aplicada no estudo de Antunes (2017). Para tanto, considerou-se a duração de chuva (d) de 24 h e um índice de vazios (n) de 33 %. A intensidade de chuva (I) foi adotada de acordo com os dados da chuva de projeto (0,194 m/h) e para a taxa de infiltração, considerou-se o coeficiente de permeabilidade determinado para a camada do subleito no valor de 0,619 m/h ($1,72 \times 10^{-4}$ m/s).

A delimitação das bacias e sub-bacias de contribuição do estacionamento da POLI/UPE (Apêndice B) resultou numa área de contribuição de 100 m². Tendo em vista que a área do pavimento das estruturas (E1 e E2) equivalem a um total aproximado de 25 m², tem-se que a relação (R) entre a área de contribuição e a área do pavimento é equivalente a 4,0. Dessa forma, determinou-se a espessura (H) da camada de reservatório:

$$H = \frac{1}{0,33} \times (4 \times 0,194 - 0,619) \therefore H = 0,47\text{m}$$

Vale salientar que a ABNT NBR 16416 (2015) especifica que as áreas de contribuição não podem exceder em até 5 vezes as áreas permeáveis do pavimento. Com relação à espessura da camada, a norma recomenda considerar o maior valor da espessura definidos pelos dimensionamentos mecânico e hidráulico. Sendo assim, adotou-se uma espessura de 47 cm para a camada de reservatório do pavimento em questão.

Em contrapartida, foi realizado o dimensionamento através do método especificado pela ABNT NBR 16416 (2015) e pela curva envelope, e verificou-se que as espessuras determinadas para a camada de reservatório apresentaram uma disparidade relevante, sendo de 5,9 cm e de 0,34 cm, respectivamente. Tendo em vista que a NRMCA (2011) especifica uma espessura hidráulica mínima de 15 cm, e que a ABNT NBR 16416 (2015) recomenda

que a parte inferior da base do pavimento esteja a um mínimo de 0,60m de distância do nível mais alto do lençol, verificou-se que esses dimensionamentos não seriam viáveis.

Para a metodologia especificada pela norma brasileira foram adotados os seguintes dados:

- de acordo com os critérios estabelecidos por Paz (2004), para a condição de umidade II, foi adotado um curve number (CN) no valor de 98;
- a retenção potencial do solo (S) de 5,18, calculada em função do CN, através da equação 14, onde:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{Equação 14})$$

- precipitação de chuva (P) de acordo com a chuva de projeto no valor de 194,6 mm = 0,195 m;
- tendo em vista a condição de que $P > 0,2S$, determinou-se o valor da precipitação efetiva ΔQ_C (P_{ef}) = 0,188 m através da equação 15, onde:

$$P_{ef} = \frac{(P - 0,2S)^2}{(P + 0,8S)} \quad (\text{Equação 15})$$

- Adotou-se o valor de $R = 4$ (conforme os valores das áreas de contribuição e das áreas permeáveis definidas $A_c = 100,00 \text{ m}^2$ e $A_p = 25,00 \text{ m}^2$;
- para a taxa de infiltração do solo, considerou-se o valor do coeficiente de permeabilidade no valor de $1,72 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, que equivale a 0,619 m/h;
- considerou-se os valores de $T_e = 1,5\text{h}$ e $V_r = 32 \%$ (conforme especificado pela ABNT NBR 16416:2015); e
- de acordo com a Equação 1, obteve-se uma espessura no valor de:

$$H_{\text{máx}} = \frac{0,188 \times 4 + 0,195 - 0,619 \times 1,50}{0,32} = 0,059 \text{ m}$$

De acordo com o método da curva envelope, foi realizada a conversão dos parâmetros da curva IDF convencional (Equação 16) para a expressão de Talbot (Equação 17).

$$i = \frac{K \times T_r^m}{(t + d)^n} \quad (\text{Equação 16})$$

$$i = \frac{a \times T_r^b}{(t + c)} \quad (\text{Equação 17})$$

Considerando-se a equação IDF do Recife (Equação 8), foram determinados os parâmetros a, b e c da expressão de Talbot:

$$c = 1,32 \times n^{-2,28} \times d^{0,89} = 1,32 \times (0,6348)^{-2,28} \times (7,3069)^{0,89} \therefore c = 21,84$$

$$b = m = 0,1671$$

$$a = 0,68 \times k \times \exp(0,06 \times n^{-0,26} \times 7,3069^{1,13}) = 0,68 \times 611,3435 \times \exp(0,06 \times 0,6348^{-0,26} \times 7,3069^{1,13}) = 787,598$$

Aplicando-se a correção do valor de a através da Equação 18, considerando-se um tempo de recorrência (T_r) de 10 anos e a duração de chuva (t) no valor de 60 min:

$$a_{\text{corrigido}} = \frac{I_{\text{usual}}}{I_{\text{talbot}}} \times a = \frac{62,077}{14,139} \therefore a_{\text{corrigido}} = 3457,93$$

O valor de β foi definido em função da Equação 3, considerando uma área de contribuição de $A = 3372,76 \text{ m}^2$, $A_{\text{pav}} = 4453,92 \text{ m}^2$ e coeficiente de runoff (C_e) = 0,8, sendo:

$$\beta = \frac{4453,92 - 3372,76 \times 0,8}{4453,92} \therefore \beta = 0,394$$

A taxa de infiltração (q_s) foi calculada através da Equação 4, considerando $\alpha = 0,1$ e $K_s = 619,2 \text{ mm/h}$. Dessa forma:

$$q_s = 0,1 \times 619,2 \therefore q_s = 61,92 \text{ mm/h}$$

Por fim, determinou-se o volume de armazenamento através da equação 2:

$$L_{\text{max}} = \left(\frac{\sqrt{3457,93}}{60} \times \sqrt{0,394} \times 10^{0,1671/2} - \frac{\sqrt{21,84}}{60} \times \sqrt{61,92} \right)^2 \therefore L_{\text{max}} = 1,1 \text{ mm}$$

E calculou-se a espessura da camada (H) por meio da equação 5:

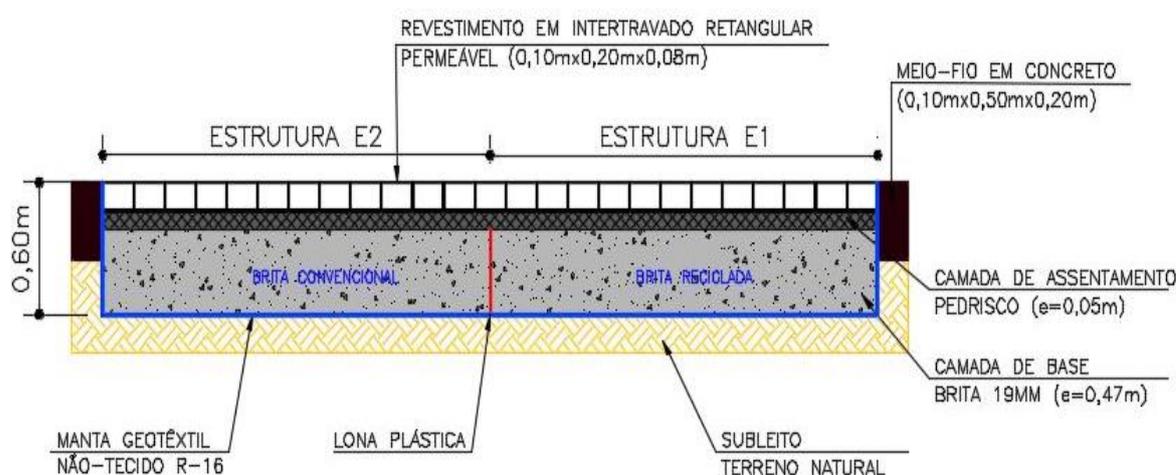
$$H = \frac{1,1}{0,32} \therefore H = 3,44 \text{ mm} = 0,34 \text{ cm}$$

4.5 Apresentação das estruturas de pavimentos permeáveis analisadas

De acordo com os dimensionamentos apresentados, e no intuito de obter um aumento da camada de reservatório do pavimento, adotou-se o maior valor da espessura identificado pelos dimensionamentos apresentados.

A Figura 68 apresenta a seção tipo do pavimento definido para as estruturas E1 e E2.

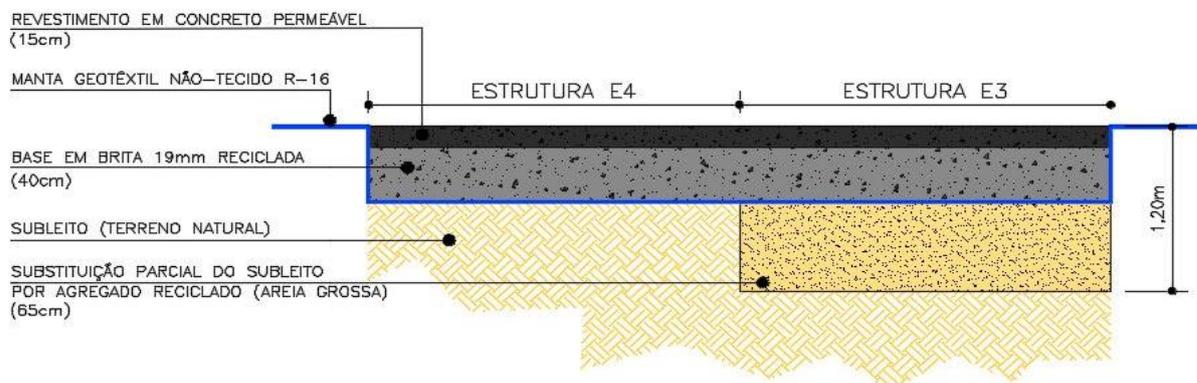
Figura 68 - Seção tipo do pavimento das estruturas (E1 e E2).



Fonte: A autora (2021).

A Figura 69 apresenta a seção tipo do pavimento definido para as estruturas E3 e E4.

Figura 69 - Seção tipo do pavimento das estruturas (E3 e E4).



Fonte: A autora (2021) adaptada de Almeida (2017).

4.6 Caracterização dos materiais das estruturas (E1 e E2) do pavimento

4.6.1 Camadas de base/assentamento e rejuntamento

As Tabela 22, Tabela 23, Tabela 24 e Tabela 25 apresentam a verificação de conformidade da distribuição granulométrica dos materiais utilizados nas camadas constituintes do pavimento, conforme os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015).

Tabela 22 - Distribuição granulométrica da camada de base - brita reciclada.

PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA	MATERIAL: camada de base - brita reciclada 12,5 mm.				
	MASSA: 5000 g				
mm	Massa média retida (g)	% retida	% retida acumulada	Base (% retida, em massa) ABNT NBR 16416 (2015)	Conformidade
37,5	0	0	0	0	SIM
25	0	0	0	0 a 5	SIM
19	56,17	1	1	0 a 35	SIM

12,5	171,13	3	4	40 a 75	NÃO
4,75	3265	65	69	90 a 100	NÃO
2,36	645,32	13	82	95 a 100	NÃO
0,075	796,75	16	98	≤ 2 %	SIM
Fundo	65,63	1	100		
TOTAL	5000,00				

Fonte: Autora (2021).

Tabela 23 - Distribuição granulométrica da camada de base - brita convencional.

PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA	MATERIAL: camada de base – brita convencional 25 mm.				
	MASSA: 5000 g				
mm	Massa média retida (g)	% retida	% retida acumulada	Base (% retida, em massa) ABNT NBR 16416 (2015)	Conformidade
37,5	0	0	0	0	
25	0	0	0	0 a 5	SIM
19	1555,00	31	31	0 a 35	SIM
12,5	3057,87	61	92	40 a 75	NÃO
4,75	340,00	7	99	90 a 100	SIM
2,36	39,00	1	100	95 a 100	SIM
0,075	5,79	0	100	≤ 2 %	SIM
Fundo	2,34	0	100		
TOTAL	5000,00				

Fonte: Autora (2021).

Tabela 24 - Distribuição granulométrica da camada de assentamento (pedrisco).

PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA	MATERIAL: camada de assentamento – pedrisco 12,5 mm				
	MASSA: 5000 g				
mm	Massa média retida (g)	% retida	% retida acumulada	Base (% retida, em massa) ABNT NBR 16416 (2015)	Conformidade
12,5	50,00	1	1	0	NÃO
9,5	800,00	16	17	0 a 15	NÃO
4,75	3195,05	64	81	70 a 90	NÃO
2,36	900,00	18	99	90 a 100	NÃO
1,18	10,00	0	99	95 a 100	SIM
0,075	21,00	0	99	≤ 2 %	SIM
Fundo	23,95	1	100		
TOTAL	5000,00				

Fonte: Autora (2021).

Tabela 25 - Distribuição granulométrica da camada de rejuntamento (areia).

PENEIRA COM ABERTURA DE MALHA	MATERIAL: camada de rejuntamento – areia (9,5 mm)				
	MASSA: 1000 g				
mm	Massa média retida (g)	% retida	% retida acumulada	Base (% retida, em massa) ABNT NBR 16416 (2015)	Conformidade
12,5	35,00	4	4	0	NÃO
9,5	30,00	3	7	0 a 15	SIM
4,75	95,00	10	17	70 a 90	NÃO
2,36	200,00	20	37	90 a 100	NÃO
1,18	190,00	19	56	95 a 100	NÃO

0,075	430,00	43	99	$\leq 2 \%$	SIM
Fundo	20,00	1	100		
TOTAL	1000,00				

Fonte: Autora (2021).

Diante dos valores obtidos, verificou-se que apesar de os materiais não se enquadrarem dentro dos percentuais recomendados para todas as faixas, os mesmos atendem aos requisitos normativos quanto ao percentual de finos passante na peneira n° 200 ($\leq 2 \%$), e dessa forma, podem ser aplicados nas camadas do pavimento.

Com relação aos ensaios para determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Abrasão Los Angeles e índice do volume de vazios (E_v), a Tabela 26 apresenta os resultados dos ensaios realizados com os agregados utilizados nas camadas de base do pavimento (brita reciclada e brita convencional).

Tabela 26 – Resultados dos ensaios realizados com os agregados da camada de base.

ENSAIOS	BRITA RECICLADA	BRITA CONVENCIONAL
Massa específica (ρ_s)	2,751 g/cm ³	2,596 g/cm ³
Massa específica aparente (ρ_{aps})	2,738 g/cm ³	2,264 g/cm ³
Absorção de água (A_a)	5,63 %	0,17 %
Abrasão Los Angeles (P)	46,44 %	23,4 %
Índice do volume de vazios (E_v)	58,49 %	49,14 %

Fonte: Autora (2021).

Comparando-se os valores da absorção de água e do índice do volume de vazios, com os da perda por Abrasão Los Angeles, observa-se que quanto maior a capacidade de absorção do material, maior será a perda por Abrasão, dessa forma pode-se dizer que a brita reciclada apresenta uma boa absorção (5,63 %), porém é menos resistente em relação a brita convencional.

De acordo com os parâmetros estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015), tanto a brita reciclada quanto a convencional atendem aos requisitos normativos quanto ao Índice do volume de vazios ($\geq 32 \%$). No entanto, com relação a perda de Abrasão Los Angeles verifica-se

que a brita reciclada está fora do limite estabelecido pela norma ($< 40\%$), e portanto é menos resistente que a brita convencional.

4.6.2 *Manta geotêxtil bidim RT-16*

Com relação a manta geotêxtil bidim RT-16, utilizada para evitar a colmatação da estrutura do pavimento, a mesma é constituída por um tecido não agulhado, de filamentos contínuos 100% poliéster. Além disso, a manta está inserida no Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H). A Tabela 27 apresenta as características da manta utilizada.

Tabela 27 - Características da manta geotêxtil bidim RT-16.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Resistência à tração longitudinal	16 kN/m
Resistência à tração transversal	14 kN/m
Puncionamento CBR	2,8 kN
Permeabilidade normal	0,38 cm/s

Fonte: Autora (2021).

4.6.3 *Peças de intertravado permeável*

De acordo com as diretrizes da ABNT NBR 9781 (2013), as peças de intertravado permeáveis utilizadas foram caracterizadas como sendo do Tipo I. Inicialmente foi selecionada uma amostragem das peças para ensaio, conforme as propriedades apresentadas na Tabela 28.

Tabela 28 - Amostragem das peças para ensaio.

PROPRIEDADE	AMOSTRA
Inspeção visual	15 peças
Avaliação dimensional	15 peças
Absorção de água	3 peças
Resistência à compressão	18 peças

Fonte: Autora (2021).

Através da inspeção visual verificou-se que as peças apresentaram um aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos, sem rebarbas, defeitos, delaminação e descamação. A Figura 70 apresenta as peças inspecionadas.

Figura 70 - Inspeção das peças de intertravado permeável.



Fonte: Autora (2021).

Para a análise da avaliação dimensional e da absorção de água das peças foram considerados os resultados dos ensaios realizados por Guedes (2020). A Figura 71 apresenta as etapas da avaliação dimensional.

Figura 71 - Avaliação dimensional das peças: comprimento (A), largura (B) e espessura (C).



Fonte: Autora (2021).

A avaliação dimensional foi realizada no intuito de verificar se as dimensões e tolerâncias atendem aos requisitos normativos. A Tabela 29 apresenta os valores encontrados.

Tabela 29 - Resultados da avaliação dimensional das peças de intertravado permeável.

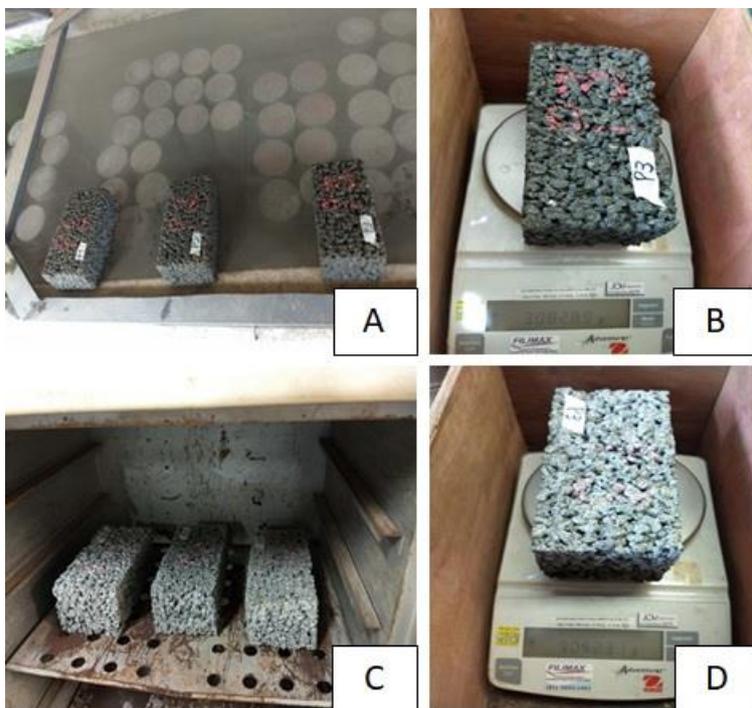
Peças de Concreto	Comprimento		Largura		Altura		Índice de Forma (IF)
	Valor (mm)	Variação (mm)	Valor (mm)	Variação (mm)	Valor (mm)	Variação (mm)	
P1	202,26	2,26	99,73	-0,27	78,23	-1,77	2,59
P2	201,90	1,90	101,36	1,36	82,13	2,13	2,46
P3	200,93	0,93	101,96	1,96	82,40	2,40	2,44
P4	202,16	2,16	100,70	0,70	78,90	-1,10	2,56
P5	201,63	1,63	100,70	0,70	79,46	-0,54	2,54
P6	200,87	0,87	100,30	0,30	77,90	-2,10	2,58
P7	201,16	1,16	102,10	2,10	84,46	4,46	2,38
P8	200,60	0,60	99,06	-0,94	80,50	0,50	2,49
P9	201,63	1,63	100,26	0,26	77,90	-2,10	2,59
P10	201,40	1,40	99,66	-0,34	79,60	-0,40	2,53
P11	200,53	0,53	99,33	-0,67	80,60	0,60	2,49
P12	200,33	0,33	100,66	0,66	79,93	-0,07	2,51
P13	201,80	1,80	99,13	-0,87	79,63	-0,37	2,53
P14	202,16	2,16	102,13	2,13	84,50	4,50	2,39
P15	200,63	0,63	102,80	2,80	83,93	3,93	2,39

Fonte: GUEDES (2020).

De acordo com os valores apresentados verifica-se que apenas as peças P7, P14 e P15 não atenderam à tolerância dimensional de ± 3 mm. Apesar disto, todas as peças estão em conformidade quanto ao índice de fôrma (IF), que consiste na relação entre o comprimento e a espessura da peça ser menor ou igual a 4.

Com relação à absorção de água, a Figura 72 mostra as etapas que foram realizadas e a Tabela 30 apresenta os resultados encontrados no estudo de Guedes (2020).

Figura 72 - Absorção de água das peças: retirada das peças do tanque (A), peso úmido (B), secagem na estufa (C), peso seco (D).



Fonte: Guedes (2020).

Tabela 30 - Valores de absorção de água das peças.

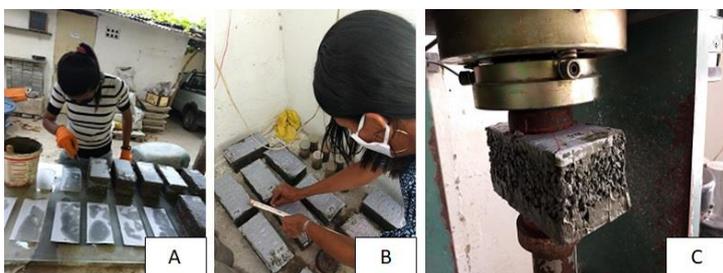
Peças de Concreto	Absorção de água (A%)
P1	2,38
P2	2,34
P3	2,37
Média	2,36

Fonte: Guedes (2020).

Dessa forma, verificou-se que o valor médio de absorção de água da amostra foi de 2,36 %, atendendo ao requisito normativo de $A (\%) \leq 6$. Além disso, a absorção unitária máxima determinada foi de 2,38 %, e portanto atende ao limite de 7 % estabelecido pela norma.

Para a determinação da resistência à compressão das peças foram realizadas as etapas mostradas na Figura 73. Os resultados apresentados (Tabela 31) referem-se a uma amostra de 18 peças ensaiadas, onde 12 foram ensaiadas por Guedes (2020).

Figura 73 - Resistência à compressão das peças: capeamento (A), marcação do eixo (B), rompimento das peças (C).



Fonte: Autora (2020).

Tabela 31 - Resultados da resistência à compressão das peças.

Peças de Concreto	Carga (Kgf)	Área de carregamento (mm ²)	Área de carregamento (m ²)	Resistência à compressão (MPa)
P1	15030,00	5674,50	0,0056745	25,98
P2	6960,00	5674,50	0,0056745	12,03
P3	14040,00	5674,50	0,0056745	24,27
P4	11900,00	5674,50	0,0056745	20,57
P5	12810,00	5674,50	0,0056745	22,15
P6	2740,00	5674,50	0,0056745	4,74 ⁸
P7	13500,00	5674,50	0,0056745	23,34
P8	9300,00	5674,50	0,0056745	16,08
P9	18270,00	5674,50	0,0056745	31,58
P10	10660,00	5674,50	0,0056745	18,43
P11	13710,00	5674,50	0,0056745	23,70
P12	6490,00	5674,50	0,0056745	11,22
P13	12710,00	5674,50	0,0056745	21,97
P14	10340,00	5674,50	0,0056745	17,88
P15	14190,00	5674,50	0,0056745	24,53
P16	4760,00	5674,50	0,0056745	8,23
P17	4070,00	5674,50	0,0056745	7,04
P18	6690,00	5674,50	0,0056745	11,57
Resistência à compressão média (fp)				18,07
Resistência à compressão estimada (fpk)				11,84

Fonte: Guedes (2020) e Autora (2021).

⁸ O valor baixo da resistência encontrado para a peça P6 é considerado como um *outlier*, e pode estar associado ao processo de fabricação e/ou com o procedimento realizado para capeamento das peças.

Pode-se observar que os valores obtidos variaram entre 4,74 MPa e 31,58 MPa, com uma resistência média $f_p = 18,07$ MPa, um desvio padrão de $s = 7,19$ e uma resistência à compressão estimada $f_{pk,est} = 11,84$ MPa. Vale salientar que para as peças de concreto permeável utilizadas em locais de tráfego leve, a ABNT NBR 16416 (2015) recomenda uma resistência mecânica característica $\geq 20,0$ MPa.

A permeabilidade das peças foi verificada através dos estudos realizados por Guedes (2020), que determinou o coeficiente de permeabilidade das peças *in loco* considerando a implantação das mesmas na calçada próximo a área de estacionamento da POLI (Figura 74).

Figura 74 - Coeficiente de permeabilidade da peça: vedação com massa de calafetar (A), ensaio (B).



Fonte: Guedes (2020).

A Tabela 32 apresenta os resultados dos coeficientes de permeabilidade determinados por Guedes (2020).

Tabela 32 - Coeficiente de permeabilidade das peças de intertravado permeável.

Ponto	Tempo (s)	Média (s)	K (mm/h)	K (m/s)
P1	15,79	16,630	55125,27	$1,531 \times 10^{-2}$
	17,47			
P2	14,62	15,355	59702,59	$1,658 \times 10^{-2}$
	16,09			
P3	13,98	13,965	65645,06	$1,823 \times 10^{-2}$
	13,95			

Fonte: Guedes (2020).

4.7 Execução das estruturas do pavimento

Inicialmente foi realizado o contato com os fornecedores dos materiais e com as construtoras, no intuito de definir o prazo para execução e o custo para implantação das estruturas. Em seguida foi verificada a distribuição granulométrica das amostras de materiais de diferentes fornecedores locais, no intuito de atender aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015). A partir de então, foi efetuada a compra dos materiais utilizados nas camadas de base, assentamento e rejuntamento. Simultaneamente foi realizada uma cotação dos serviços prestados para viabilizar a contratação dos serviços necessários para execução das estruturas.

A metodologia construtiva adotada compreendeu a implantação de três etapas: serviços preliminares, terraplenagem e pavimentação.

- ETAPA 01 - SERVIÇOS PRELIMINARES: nesta etapa foi realizada a limpeza da área, o isolamento, e a sinalização do local com fita zebra e barrotes de madeira fixados em base de concreto para evitar a ocorrência de acidentes com os transeuntes. Em seguida, foi realizada a demolição mecânica do piso existente (intertravado sextavado assentado com areia fina) com o auxílio da ferramenta Makita - 220 volts (Figura 75).

Figura 75 - Demolição de piso existente.



Fonte: Autora (2021).

ETAPA 02 - TERRAPLENAGEM: inicialmente foi realizada a locação da área para implantação das estruturas através das medições com trena e da verificação do alinhamento utilizando linhas de nylon. A partir de então foi realizada a escavação manual com o auxílio da picareta chibanca, até atingir a cota definida em projeto (60 cm). Em seguida, verificou-se a taxa de infiltração do subleito em três pontos distintos, através do ensaio com o anel de infiltração simples. Posteriormente foi realizada a molhagem, regularização e a compactação do subleito de forma mecanizada, utilizando a lavadora de alta pressão e a placa vibratória, respectivamente. Foram verificados o grau de compactação (GC) e a umidade ótima do subleito através dos ensaios de densidade *in situ* (frasco de areia) e do speedy. A Figura 76 apresenta a sequência das etapas que foram descritas:

Figura 76 - Execução das etapas de terraplenagem: escavação (A), verificação da taxa de infiltração (B), compactação do subleito (C) e verificação do GC e da umidade do subleito.



Fonte: Autora (2021).

➤ **ETAPA 03 – PAVIMENTAÇÃO:** esta etapa teve início com a implantação da manta geotêxtil R-16 na superfície do subleito. Acima da manta foram implantadas as camadas de base constituídas por brita 12,5 mm reciclada e 25 mm convencional nas estruturas E1 e E2, respectivamente. Durante a execução das camadas de base foi realizada a molhagem da mesma para facilitar a compactação realizada a cada 10 cm, até atingir a espessura determinada em projeto (47 cm). No intuito de garantir a separação dos diferentes

materiais utilizados na base, foi implantada uma lona plástica entre as camadas. A Figura 77 apresenta a sequência destas etapas.

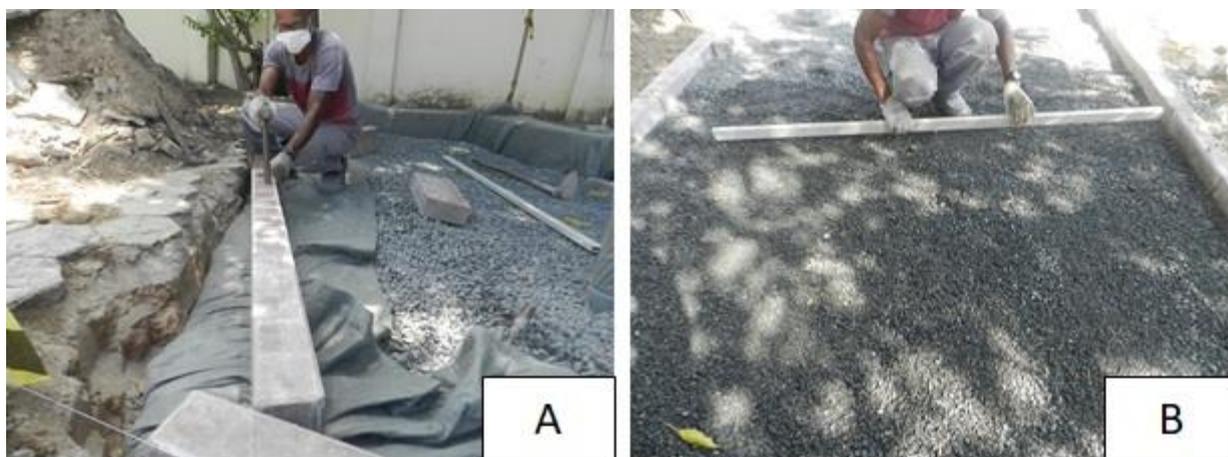
Figura 77 - Execução das etapas de pavimentação: implantação da manta geotêxtil (A), molhagem da camada de base (B), compactação da camada de base (C) e camada de base concluída (D).



Fonte: Autora (2021).

Em seguida foram assentados meio-fio (recravas) em todo o entorno da pista experimental, para manter o travamento das peças de intertravado permeável, utilizadas como revestimento. Imediatamente acima da camada de base foi executada a camada de assentamento (pedrisco/cascalho), que foi regularizada com o auxílio da régua metálica. A sequência das etapas estão sendo apresentadas na Figura 78.

Figura 78 - Execução das etapas de pavimentação: implantação de meio-fio (A), execução da camada de assentamento (B).



Fonte: Autora (2021).

Posteriormente executou-se a camada de revestimento com peças de intertravado permeável (20 x 10 x 8) cm. Em seguida foi implantado o rejunte entre as peças, utilizando areia grossa. O espalhamento deste material foi realizado através da varrição manual com o auxílio de um vassourão. A Figura 79 mostra a sequência destas etapas.

Figura 79 - Execução da camada de revestimento (A e B) e rejuntamento (C e D).



Fonte: Autora (2021).

4.8 Custos das estruturas de pavimento implantadas (E1 e E2)

Na Tabela 33 estão sendo apresentados os custos referentes aos materiais adquiridos e mão-de-obra necessária para realização dos serviços.

Tabela 33 – Custos para implantação das estruturas revestidas com intertravado (E1 e E2).

ITEM	UNIDADE	PREÇO (R\$)
Execução dos serviços	m ²	R\$ 155,60
Fornecimento de manta geotêxtil do tipo não-tecido R-16	m ²	R\$ 29,87
Fornecimento de brita reciclada (RCD)	Ton.	R\$ 20,66
Fornecimento de brita convencional	Ton.	R\$ 23,01
Fornecimento de pedrisco (cascalho)	m ³	R\$ 0,11
Fornecimento de areia grossa	m ³	R\$ 0,12
Fornecimento de intertravado permeável	m ²	R\$ 42,40
Fornecimento de meio-fio	m	R\$ 38,32
Transporte de materiais para a POLI/UPE	m ³ x Km	R\$ 540,00
TOTAL/ m²		R\$ 850,09

Fonte: Autora (2021).

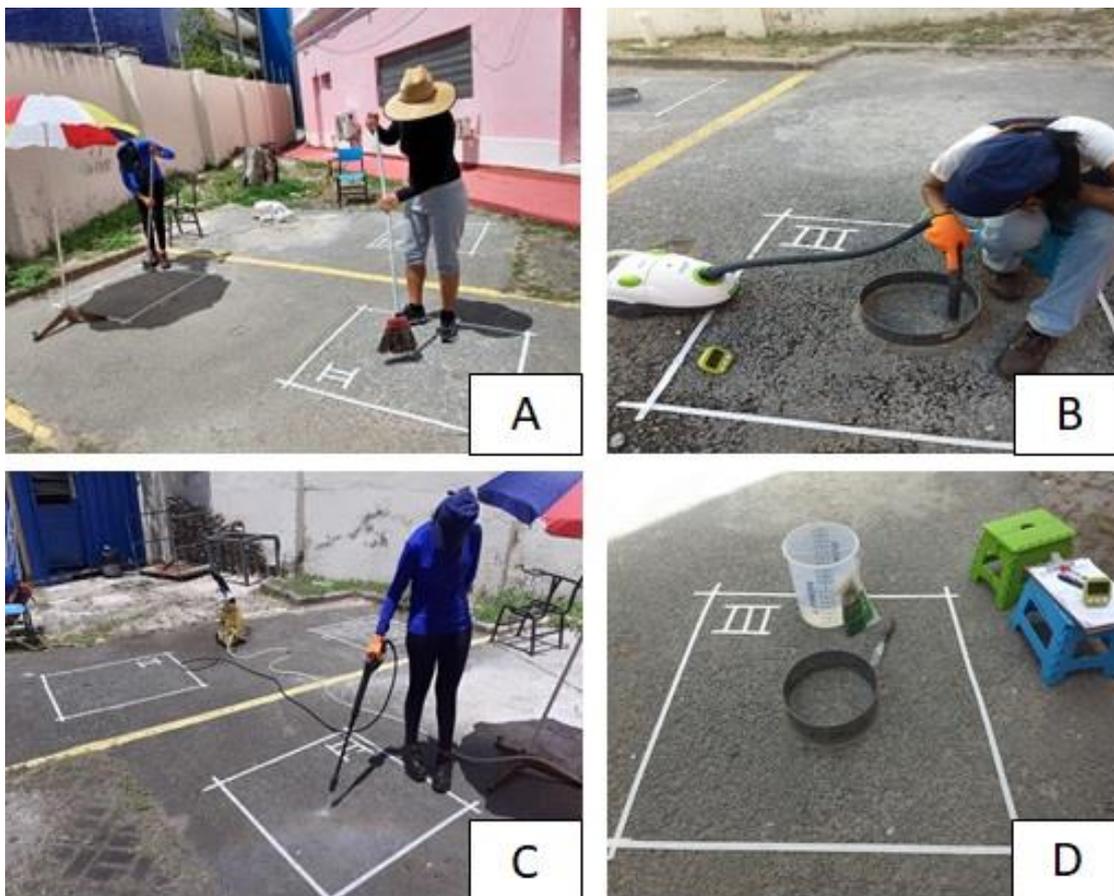
Em comparação com os custos para implantação das estruturas de pavimentos constituídos por revestimento em concreto e base em brita graduada convencionais (R\$ 759,44/m²), abordado no estudo realizado por Silva (2017), verifica-se que o custo-benefício é viável para a implantação dos pavimentos permeáveis.

4.9 Manutenção

Inicialmente, no intuito de verificar a capacidade de permeabilidade do pavimento implantado por Almeida (2017), foram realizados ensaios para determinação do coeficiente de permeabilidade da estrutura implantada. Os resultados mostraram que o pavimento estava colmatado, tendo em vista que apresentou resultados da ordem de 10⁻⁵ m/s. Diante deste fato, e no intuito de avaliar a influência da manutenção no desempenho dos pavimentos

permeáveis, optou-se por aplicar técnicas de manutenção (Figura 80) nas estruturas dos pavimentos com revestimento em concreto permeável (E3 e E4).

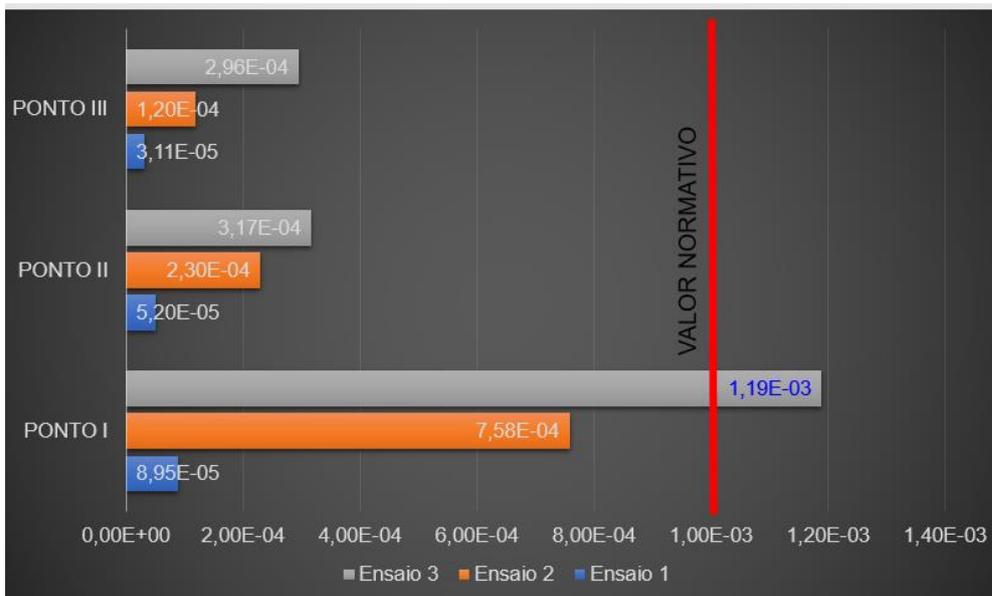
Figura 80 - Etapas da manutenção na estrutura de pavimento de concreto permeável: varrição manual (A), equipamento de sucção (B), aplicação de jato de água (C), coeficiente de permeabilidade (D).



Fonte: Autora (2021).

Após o término da manutenção foram realizados novamente os ensaios para determinação do coeficiente de permeabilidade. Os resultados encontrados (Figura 81) revelaram a eficácia da manutenção adequada, tendo em vista que os valores obtidos variaram de 10^{-4} m/s a 10^{-3} m/s, aproximando-se do valor normativo especificado pela ABNT NBR 16416 (2015).

Figura 81 - Resultados dos coeficientes de permeabilidade antes e após a manutenção.



Fonte: Autora (2021).

4.10 Monitoramento do lençol freático

No período compreendido entre Dezembro/2020 e Maio/2021 foram realizadas medições semanais em 06 pontos diferentes do estacionamento da POLI/UPE, com o auxílio do medidor de nível d'água (Figura 82).

Figura 82 - Monitoramento do nível d'água no ponto (P4) na estrutura E3 e no ponto (A2) na estrutura E2.



Fonte: Autora (2021).

O Apêndice C apresenta os gráficos com os dados referentes ao monitoramento do nível do lençol freático, bem como os dados de precipitação mensal coletados da estação Torreão do CEMADEN. A localização dos piezômetros está sendo apresentada no Apêndice A, juntamente com a planta do levantamento topográfico.

4.11 Análise do desempenho das estruturas de pavimentos permeáveis

A permeabilidade das estruturas de pavimento (E1 e E2) foi verificada através da determinação do coeficiente de permeabilidade. Para tanto, foram realizados seis ensaios em dias distintos: 16/03/2021, 28/03/2021, 01/04/2021, 04/07/2021, 06/07/2021 e 10/07/2021. Os ensaios foram realizados em 3 pontos diferentes de cada estrutura. A Figura 83 apresenta o procedimento adotado, conforme o procedimento estabelecido pela ABNT NBR 16416 (2015).

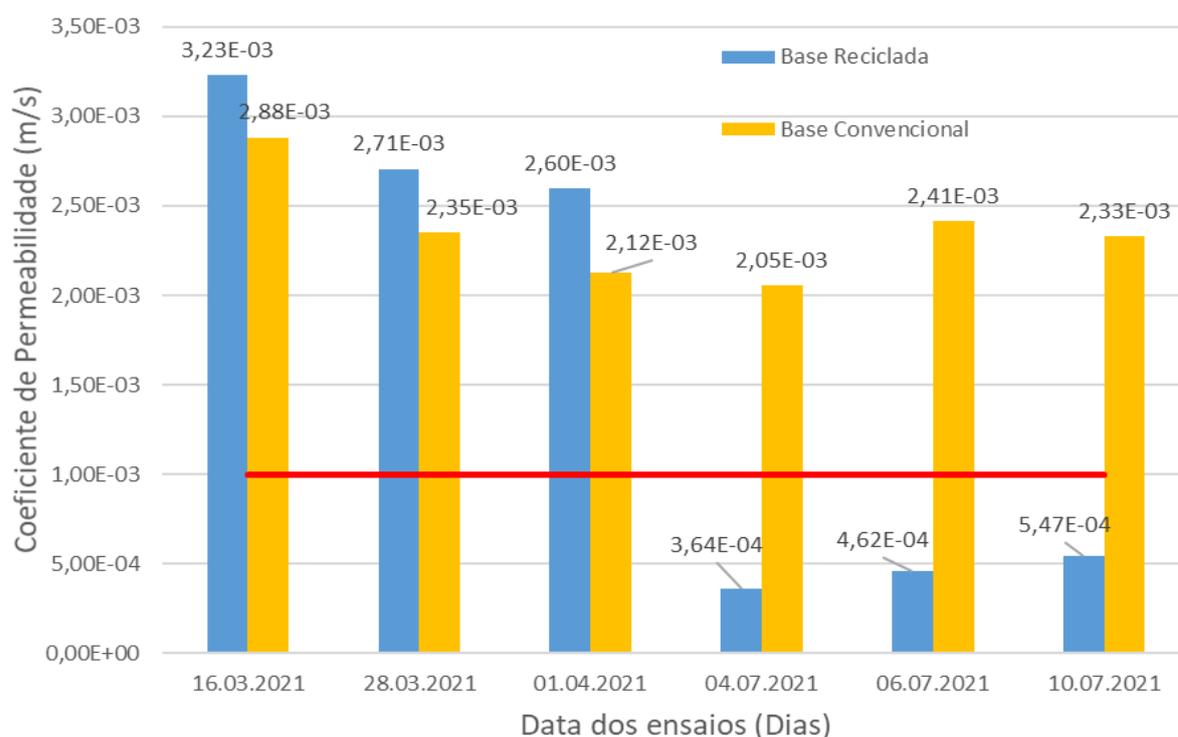
Figura 83 - Etapas do ensaio para verificação do coeficiente de permeabilidade da estrutura de pavimento: demarcação da área do ensaio (A), vedação do anel de infiltração com a massa de calafetar (B), pontos ensaiados (C), pré-molhagem (D) e ensaios (E e F).



Fonte: Autora (2021).

A Figura 84 apresenta os valores dos coeficientes de permeabilidade determinados pelos ensaios para as estruturas de pavimentos permeáveis constituídas por base com brita reciclada 12,5 mm (E1) e por base com brita convencional 25 mm (E2).

Figura 84 - Resultados do coeficiente de permeabilidade para as estruturas (E1 e E2).



Fonte: Autora (2021).

Os coeficientes de permeabilidade médios determinados para a estrutura E1 (base com brita reciclada) foi de $1,65 \times 10^{-3}$ m/s, enquanto que para a estrutura E2 (base com brita convencional) foi de $2,36 \times 10^{-3}$ m/s. Verifica-se que não houve variação significativa entre os valores obtidos para os coeficientes e que os mesmos estão em conformidade com os parâmetros normativos ($>10^{-3}$ m/s) estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015).

O desempenho das estruturas de pavimentos permeáveis depende intrinsecamente das características do solo do subleito, bem como das propriedades dos materiais (agregados e revestimento) utilizados nas camadas do pavimento. Portanto, a Tabela 34 apresenta um resumo com os resultados de todos os ensaios que foram realizados.

Tabela 34 – Resumo dos ensaios realizados.

MATERIAL	ENSAIO	RESULTADOS
Solo (Terreno natural)	Sondagem à Pá e picareta e a Trado	Classificado pelo sistema TRB como A-2 e A-2-4
	Análise granulométrica	Solo predominantemente arenoso e argiloso
	Determinação do Limite de Liquidez (LL)	AM1 = 20,8% AM2 (Subleito) a AM4 = NL
	Determinação do Limite de Plasticidade (LP)	AM1 = 13% AM2 a AM4 = NP
	Índice de plasticidade (IP)	AM1 = 7,8% AM2 a AM4 = 0
	Ensaio de compactação (Proctor Intermediário)	Densidade máxima = 1,83 g/cm ³ Umidade ótima = 8,61 % Grau de compactação (GC) médio = 90,27 %
	Índice de suporte califórnia (ISC)	CBR = ISC = 32 %
	Taxa de infiltração <i>in loco</i>	Variando entre 310,59 mm/h e 798,64 mm/h
	Coefficiente de permeabilidade do solo (K - Medido em laboratório)	Subleito = 1,72 x 10 ⁻⁴ m/s
Agregados da camada de base (Britas reciclada e convencional)	Análise granulométrica	Brita RCD = 12,5 mm Brita convencional = 25 mm Pedrisco = 12,5 mm Rejunte = 9,5 mm
	Absorção de água (A _a)	Brita RCD = 5,63% Brita convencional = 0,17 %
	Abrasão Los Angeles (P)	Brita RCD = 46,44 % Brita convencional = 23,4 %
	Índice do volume de vazios (E _v)	Brita RCD = 58,49 % Brita convencional = 49,14 %
	Massa específica (ρ _s)	Brita RCD (ρ _s) = 2,751 g/cm ³ Brita convencional (ρ _s) = 2,596 g/cm ³
	Massa específica aparente (ρ _{aps})	Brita RCD (ρ _{aps}) = 2,738 g/cm ³ Brita convencional (ρ _{aps}) = 2,264 g/cm ³
	Massa unitária no estado compactado	Brita RCD = 1078 Kg/m ³ Brita convencional = 1399 Kg/m ³

MATERIAL	ENSAIO	RESULTADOS
Revestimento (Peça de intertravado permeável – estruturas E1 e E2)	Inspeção visual	Peças com aspecto homogêneo, arestas regulares, ângulos retos, sem rebarbas, defeitos, delaminação e descamação
	Avaliação dimensional	Conformidade quanto ao IF e 20 % das peças desconformes quanto a tolerância dimensional
	Absorção de água (A)	2,36%
	Resistência à compressão simples	Resistência à compressão média (fp) = 18,07 MPa Resistência à compressão estimada (fpk) = 11,84 MPa
	Coeficiente de permeabilidade (K)	1,67 x 10 ⁻² m/s
Estrutura do pavimento revestido com intertravado permeável (E1 e E2)	Coeficiente de permeabilidade (K)	Base RCD (E1) = 1,65 x 10 ⁻³ m/s Base convencional (E2) = 2,36 x 10 ⁻³ m/s
Estrutura do pavimento revestido com concreto permeável (E3 e E4)	Coeficiente de permeabilidade (K) antes da manutenção	5,45 x 10 ⁻⁵ m/s
	Coeficiente de permeabilidade (K) depois da manutenção	6,01 x 10 ⁻⁴ m/s

Fonte: Autora (2021).

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados nesta pesquisa, verificou-se que a região de estudo (Estacionamento da POLI/UPE) está situada entre os 159 pontos de alagamentos da cidade do Recife, e é caracterizada como uma área de tráfego leve. Do ponto de vista geológico é constituída por um solo com presença predominante de material arenoso e argiloso, e possui um subleito que é classificado com comportamento de excelente a bom e grau de permeabilidade médio.

As estruturas de pavimentos analisadas são compostas por revestimentos em intertravado (E1 e E2), com base em brita reciclada e convencional, respectivamente e por revestimentos em concreto permeável (E3 e E4), com base em brita reciclada. Foi realizada uma análise das propriedades hidráulicas, físicas e mecânicas dos materiais constituintes das camadas do pavimento implantado nas pistas experimentais. Quanto à granulometria, verificou-se que todos os materiais atendem aos requisitos normativos de percentual de finos passante na peneira nº 200 ($\leq 2\%$), e dessa forma, podem ser aplicados nas camadas do pavimento.

Comparando-se os valores da absorção de água e do índice do volume de vazios, com os da perda por Abrasão Los Angeles, observa-se que a brita reciclada apresenta uma boa absorção (5,63 %) em relação a brita convencional (0,17 %), porém é menos resistente. Apesar disto, as divergências encontradas quanto à capacidade de absorção de água e resistência dos agregados constituintes das camadas de base (britas reciclada e convencional) não interferiram significativamente no desempenho das estruturas (E1 e E2), tendo em vista que a permeabilidade das mesmas apresentaram valores similares. Quanto às propriedades dos intertravados utilizados como revestimento das estruturas E1 e E2, pode-se dizer que os mesmos atendem aos parâmetros de absorção de água e apresentam uma resistência à compressão média (f_p) equivalente a 18,07 MPa.

Os valores obtidos para os coeficientes de permeabilidade, na fase recém-construída, das estruturas com revestimento em intertravado permeável (E1 e E2), são da ordem de $1,65 \times 10^{-3}$ m/s e $2,36 \times 10^{-3}$ m/s, respectivamente, enquanto que para as estruturas com revestimento em concreto permeável (E3 e E4), são de $1,83 \times 10^{-3}$ m/s. Dessa forma, pode-se dizer que as estruturas possuem um desempenho similar quanto à permeabilidade.

No que diz respeito à durabilidade dos pavimentos permeáveis, verificou-se que a implantação de técnicas de manutenção, tais como limpeza com varrição manual, aplicação de equipamento de sucção para retirada de finos e jato de água sob pressão são eficazes para recuperar a permeabilidade do pavimento, como no caso das estruturas revestidas em concreto permeável (E3 e E4) que foram analisadas neste trabalho. Os coeficientes de permeabilidade determinados para as estruturas antes da manutenção, foram da ordem de 10^{-5} m/s e após a manutenção atingiram valores da ordem de 10^{-4} m/s a 10^{-3} m/s. Este fato ressalta a importância da realização de manutenção periódica para evitar a colmatação e manter a vida útil dos pavimentos permeáveis.

No intuito de favorecer a capacidade de adaptação das cidades para enfrentar os alagamentos, os pavimentos permeáveis têm sido implantados como soluções inovadoras e sustentáveis. Os mesmos proporcionam a realimentação do aquífero, a redução das ilhas de calor, a redução dos custos para implantação do sistema de drenagem tradicional, o aumento da segurança e do conforto nas vias e a redução da erosão do solo urbano. Este tipo de pavimento vêm sendo implantado nos empreendimentos para atender às exigências das legislações municipais, em relação à infiltração e permeabilidade na pavimentação dos terrenos. Em Recife/PE, o revestimento mais utilizado é o de peças de concreto, que vem sendo empregado em estacionamentos de unidades farmacêuticas, condomínios e calçadas.

Recomendações para trabalhos futuros:

- Avaliar a permeabilidade do pavimento permeável, verificando a eficiência da implantação de técnicas de manutenção;
- Realizar o monitoramento hidráulico das estruturas de pavimentos permeáveis e determinar a capacidade de armazenamento das mesmas;
- Realizar a análise estrutural do pavimento permeável, identificando a capacidade de carga que o mesmo pode suportar;
- Analisar as propriedades hidráulicas, físicas e mecânicas dos materiais que constituem as estruturas do pavimento;
- Analisar o desempenho e os benefícios ambientais proporcionados pelas estruturas de pavimentos permeáveis através da aplicação de ensaios não-destrutivos.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2011**. 2011. 186p. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2020.

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

ADRIARQ. 2014. Disponível em: <https://adriarq.blogspot.com/2014/11/piso-drenante-placa-drenante-pisos.html>. Acesso em: 05 de fev. 2020.

ALEGRIA, Manuela. **Pavimento permeável: solução sustentável para a redução de enchentes**. Revista Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.revistameioambiente.com.br/2011/03/17/pavimento-permeavel-solucao-sustentavel-para-a-reducao-de-enchentes/>. Acesso em: 25 jan. 2020.

ALMEIDA, N. **Projeto para produção de pavimento em concreto permeável no parque de estacionamento da POLI-UPE**. 2016. 90p. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

ALMEIDA, N. **Análise de viabilidade técnica para utilização de resíduos de construção e demolição no subleito e na base de um pavimento em concreto permeável**. 2017. 148 p. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522.1**: Specification for Pervious Concrete Pavement. Farmington Hills, 2013.

_____. **ACI 522R**: Report on Pervious Concrete. Farmington Hills, 2010.

_____. **ACI 522R**: Pervious Concrete. Michigan, 2006.

_____. **ACI 330R**: Guide for Design and Construction of Concrete Parking Lots. Farmington Hills, 2008.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - ASCE. **Design and construction of urban stormwater management systems**. New York: ASCE, 1992. 724p.

_____. **Permeable Pavements: Recommended Design Guidelines**. Technical Report. Permeable Pavement Technical Committee of the Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers, United States, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1688/C1688M**: Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete. West Conshohocken, 2014.

_____. **C1701/C1701M**: Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. West Conshohocken, 2009.

_____. **C1747/C1747M**: Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion. West Conshohocken, 2013.

ANDRADE, G. **Dimensionamento de pavimentos permeáveis em Boa Vista – RR para redução do escoamento superficial**. 2016. 97p. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, RR, 2016.

ANISAH; MULYONO, T. Properties of pervious concrete with various types and sizes of aggregate. **MATEC Web of Conferences**, v. 276, p. 01025, 2019.

ANTUNES, P. **Uso do Pavimento Permeável de Concreto para Atenuação de Cheias Urbanas**. 2017. 132p. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2017.

ARAÚJO, P.; TUCCI, C.; GOLDENFUM, J. **Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. v5. n.3 Jul/Set 2000, 21-29. Porto Alegre, 1999.

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

_____. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

_____. **NBR 7185**: Solo - Determinação da massa específica aparente, in situ, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 7212**: Execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **NBR 12142:** Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

_____. **NBR 13292:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 14545:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

_____. **NBR 15805:** Pisos elevados de placas de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 15953:** Pavimento intertravado com peças de concreto — Execução. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

_____. **NBR 16416:** Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **NBR 16972:** Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 16973:** Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

_____. **NBR 16974:** Agregado graúdo - Ensaio de abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

AZZOUT, Y. *et al.* 1994. **Techniques alternatives en assainissement pluvial.** Paris: Technique et Documentation – Lavoisier. 372p.

BALBO, J. **Pavimentos de Concreto Permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente.** São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

BALLARD, W. *et al.* **The SuDS Manual.** Londres, Inglaterra, 2007.

BALLARD, W. *et al.* **The SuDS Manual.** Londres, Inglaterra, 2015.

BARRAUD, S.; NASCIMENTO, N.; BAPTISTA, M. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana,** Porto Alegre: ABRH, 2005. 318p.

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

BATISTA, N. *et al.* Estudo da viabilidade técnica do uso de concreto permeável em pavimentos urbanos de baixo tráfego utilizando agregado graúdo regional. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia,** v. 5, n. 8, 2019.

BECHARA, L. **Concreto Poroso como revestimento de pavimento permeável: alternativa de drenagem urbana não estrutural à região metropolitana de Belém.** 2017. 119p.

Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

BHUTTA, R. *et al.* Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**. Vol. 13 pag 67-73. Malásia, 2012.

BORST, M.; RAZZAGHMANESH, M. Investigation clogging dynamic of permeable pavement systems using embedded sensors. EPA. 2018.

BOTELHO, D. Concreto permeável: análise de desempenho voltada para pavimentação, a fim de combater inundações em centros urbanos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 18300–18320, 2020.

BOTTEON, L. **Desenvolvimento e Caracterização de Concreto Permeável para Utilização em Blocos Intertravados para Estacionamentos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Fluminense, Niterói.

BRASIL. **Lei nº 11.445, 05 de janeiro de 2007**: Institui a Política Nacional de Saneamento Básico. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm. Acesso em: 22 mai. 2020.

BRASIL. **Programa Drenagem Urbana Sustentável**. Ministério das Cidades. 2006. Manual para apresentação de propostas. 23 p. 2006.

BRASTON, Pisos personalizados. **Pisos drenantes área permeável Santana de Parnaíba**. Disponível em: <http://www.braston.com.br/bloquete/piso-drenante/placa-drenante/pisos-drenantes-area-permeavel-santana-de-parnaiba>. Acesso em: 06 jun. 2020.

BURIOL, G., RIGHES, A., MAUS, V. **Pavimentos Permeáveis e escoamento superficial da água em áreas urbanas**. I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Nordeste, 2007. 9p.

BUTLER, D.; DAVIES, J. **Urban drainage**. Londres: Spon Press, 2004. 543p.

CABRAL, J.J.S.P.; ALENCAR, A. V., **Gestão de Território e Manejo Integrado das Águas Urbanas**. Escola Internacional da Água para o Desenvolvimento – Hydroaid, p.111-130, 2005.

CAMARAGIBE. **Lei complementar nº 341, de 13 de julho de 2007**: Institui o Plano Diretor do Município de Camaragibe e estabelece as diretrizes para a sua implementação. Disponível em: <https://www.camaragibe.pe.gov.br/mdocs-posts/plano-diretor-2007/>. Acesso em: 27 set. 2019.

CAMARAGIBE. **Lei nº 0743/2017**: Institui o Programa IPTU VERDE. Disponível em: https://www.camaragibe.pe.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/cartilha-A5_1.pdf. Acesso em: 25 mai. 2020.

CANHOLI, J. F. **Medidas de controle in situ do escoamento superficial em áreas urbanas: análise de aspectos técnicos e legais**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo - São Paulo, 2013. 167 p.

CAPUTO, H. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª ed. Revisada e ampliada. v.1. Editora: LTC, Rio de Janeiro, 1988.

CASACOR. **Calçada da CASA COR SÃO PAULO é assinada por Benedito Abbud**. 2015. Disponível em: <http://casacor.abril.com.br/paisagismo/calçada-da-casa-cor-sao-paulo-e-assinada-por-benedito-abbud/>. Acesso em: 09 out. 2019.

CASTRO, T. **Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis**. 2011. 92p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

CHANDRAPPA, A. K.; BILIGIRI, K. P. Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, v.111, 2016, p.262-274.

CHAVES, P. e MOREIRA, V. **Estudo Experimental de Dosagem de Concreto Poroso para pavimentos permeáveis na região metropolitana de Belém**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

CHEN, H.; YANG, H.; LIN, Z. Study on the Process and Characteristics of Clogging for Ceramic Permeable Brick. *Hindawi - Advances in Civil Engineering*, v. 2021, 2019.

CHINDAPRASIRT, P. *et al.* **Cement paste characteristics and porous concrete properties**. **Construction and Building Materials**. vol. 22 pag 894-901. Japão, 2008.

CLIMATEMPO. **Chuva extrema em Recife e João Pessoa em 13/06/2019**. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/noticia/2019/06/13/chuva-extrema-em-recife-e-joao-pessoa-5634>. Acesso em: 10 fev. 2021.

COOPER, A. **Estudo de viabilidade técnica da implantação de pavimentos permeáveis do tipo infiltração total para redução do escoamento superficial, na cidade de Alegre/RS**. 2013. 57p. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pampa, Alegre, 2013.

COPAVEL. Aeroporto Santos Dumont. 2019. Disponível em: <http://www.copavel.com.br/aeroporto-santos-dumont/>. Acesso em: 20 jan. 2021.

COSTA, F. **Análise e desenvolvimento de misturas de concreto permeável para aplicação em pavimentação**. 2019. 181p. Tese (Doutorado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

COUTINHO, A. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. 2011. 153p. Dissertação (Mestrado da Pós-graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

DECORFÁCIL. **Concregrama: o que é, vantagens e dicas para fazer a escolha certa**. 2021. Disponível em: <https://www.decorfacil.com/concregrama/>.

DELATTE, N. **Structural Design of Pervious Concrete Pavement**. In: Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington, DC, 2007.

DELATTE, N.; CLEARY, J. **Developing a Structural Design Method for Pervious Concrete Pavement**. Disponível em: <http://www.nssga.org/aftre/Symposium/2006-06.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2020.

DELATTE, *et al.* **Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete Pavements**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. v. 2113, p. 132-139, Nov. 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **DNER – ME 052/94: Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com emprego do “Speedy”**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **DNER-ES 386/99: Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de Estudos de Tráfego**. Rio de Janeiro, RJ, 2006. 384p. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/manual_estudos_trafego.pdf. Acesso em: 01 out. 2019.

_____. **Manual de Pavimentação**. IPR -719. Rio de Janeiro, RJ, 2006. 278p. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimenta%E7%E3o_05.12.06.pdf. Acesso em: 01 out. 2019.

_____. **Norma 055 – ME. Pavimento rígido – Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos – Método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **061: Pavimento rígido – Defeitos - Terminologia**. Rio de Janeiro: Diretoria de Planejamento e Pesquisa, 2004. 13p.

DIAS, T.; LEÃO, J. **Estudo de concreto asfáltico drenante: Camada porosa de atrito (CPA)**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). 2014. Universidade Federal de São João del-Rei, Ouro Branco/MG, 2014. 64p.

DONATO, M. Pavimento de concreto drenante: Estudo da granulometria que favorece a drenagem e que afete o mínimo na resistência. **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, v. 33, n. 1, p. 2016–2027, 2019.

ECOEFICIENTES. **IPTU Verde e outras propostas de incentivos governamentais para a construção sustentável**. Disponível em: <http://www.ecoeficientes.com.br/iptu-verde-e-outras-propostas-de-incentivos-governamentais-para-a-construcao-sustentavel/>. Acesso em: 30 mai. 2020.

EISENBERG, B., LINDOW, K., SMITH, D., 2013. **Permeable Pavements: Recommended Design Guidelines**. Permeable Pavement Technical Committee of the Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers. 262p.

EMLURB. **Relatório de Andamento do RAP - Caracterização da Área de Influência Direta – AID**. In: Estudo elaboração dos estudos de concepção para gestão e manejo de águas

pluviais e drenagem urbana do Recife. (Versão concedida em visita técnica). Recife, out. 2013.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Conceptual Green Infrastructure Design for Washington Street, City of Sanford**. 2016. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/sanford_concept_design_508.pdf. Acesso em: 04 Jun. 2021.

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

_____. Urban Heat Island Basics. In: **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies**. 2008. Draft. Disponível em: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>. Acesso em: 4 abr. 2021.

EVARISTO, F. *et al.* Avaliação da Permeabilidade de Pavimentos com Revestimento de Concreto Permeável. In: SEMANA OFICIAL DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA, 74., 2017, Belém. **Anais [...]**. Disponível em: http://www.confex.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/civil/36_adpdprdc.pdf. Acesso em: 21 out. 2019.

FARIAS, A. B. **Análise técnica e econômica de resíduos de construção e demolição aplicados em pavimentação**. 2013. 182p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2013.

FERNANDES, M. T. **Avaliação das técnicas de laboratório e campo para realização de ensaios de permeabilidade de solos**. 2017. 159p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2017.

FRANCIS, A. M. **Early Concrete Buildings in Britain**. Concrete and Constructional Engineering. Londres, v. 60, n. 2, p. 73-75. Fev. 1965.

FRANCO, M.; MARUYAMA, C. Pavimentos Permeáveis e infraestrutura verde. In: **CIDADES VERDES**, v. 04, n.09, 2016, São Paulo.

GALVAO, R. **Comportamento do concreto permeável composto por diferentes proporções e composições granulométricas**. 2017. Dissertação em andamento com previsão de publicação em 2017 (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife.

GIRARDI, R.; FINOCCHIARO, P. Concreto permeável produzido com agregado reciclado. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, n. 5, p. 19-26, 2017.

GOOGLE EARTH. Programa de Imagens por Satélite. Versão 7.3.3.7786 (64-bit). Acesso em: 10 fev. 2020.

GOLDENFUM, J.; TUCCI, C.; ARAÚJO, P. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, p. 21-29, jul./set., 2000.

GONÇALVES, R. **Agregados reciclados de resíduos de concreto – um novo material para dosagens estruturais.** 2001. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GLASSER, Tecnologia em alvenaria e pavimentação. **Pisos permeáveis: economia, design e eficiência.** 2017. Disponível em: <http://glasser.com.br/pisos-permeaveis-economia-design-e-eficiencia/>. Acesso em: 05 jun. 2020.

GUEDES, C. S. ; SILVA , E.P.; SIQUEIRA, E.Q. Análise do coeficiente de escoamento do pavimento permeável do tipo paver. *In:XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS.* ABRH 2013. Anais... Bento Gonçalves, 2013. 10 p.

GUEDES,V. **Peças de concreto permeável utilizadas como revestimento para pavimentos: propriedades.** 2020. 63p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2020.

HASELBACH, L. *et al.* **Guidance for usage of Permeable Pavement at Airports.** 2017. Airport cooperative research program – The National Academies of Sciences, Engineering, Medicine, Washington (EUA).

HENDERSON, V. **Evaluation of the Performance of Pervious Concrete Pavement in the Canadian Climate.** 2012. Thesis (Doctor of Philosophy in Civil Engineering) – University of Waterloo, Waterloo.

HENDERSON, V.; TIGHE, S.; NORRIS, J. **Pervious Concrete Pavement.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. v. 2095, p. 13–21, Nov. 2009.

HOLTZ, F. *et al.* **Aplicação de concreto permeável na drenagem de zonas urbanas.** *In:53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO.* IBRACON 2011. Anais... Santa Catarina, 2011. 138 p.

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

HUNT, W.F.; COLLINS, K. A. **Permeable Pavement: Research Updat and Design Implications. Special Report.** Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University, 2008;

IBGE. Pesquisa de Informações Básicas Municipais (Munic). 2013. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/brasil/cidades/ibge-sem-plano-diretor-10-das-cidades-desobedecem-a-lei,79426c4da30b5410VgnVCM4000009bcceb0aRCRD.html>. Acesso em: 19 mar. 2020.

IBGE. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>. Acesso em: 10 mar. 2021.

ICPI - Interlocking Concrete Pavement Institute. **Olympic Village Vancouver BC** [2016]. Disponível em: <https://www.icpi.org/project-profiles/olympic-village-vancouver-bc>. Acesso em: 15 nov. 2020.

INOVACIVIL. **Descubra tudo sobre asfalto permeável**. 2019. Disponível em: <https://www.inovacivil.com.br/asfalto-permeavel/>. Acesso em: 30 mai. 2021.

INSTRUÇÃO DE PROJETO. **IP-06/2004**: Dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto. São Paulo, 2004. 17p. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/obras/normas_tecnicas/index.php?p=31336. Acesso em: 28 fev. 2020.

INTERPAVE. **Permeable pavements: Guide to design, construction and maintenance of concrete block permeable pavements**, Ed. 6. Leicester, Reino Unido, 2010.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 17785-1**: Testing methods for pervious concrete – part 1: infiltration rate. Genebra, 2016.

JAIN, A.; CHOUHAN, S. **Effect of Shape of Aggregate on Compressive Strength and Permeability Properties of Pervious Concrete**. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies. v.1 pag 120-126. India, 2011.

JIMÉNEZ, A. **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação**. 2011. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2011.

KARCHER. **Varredeira manual Karcher S6 Twin com 3 escovas**. Disponível em: <https://karcher-center-altex.com.br/produto/varredeira-manual-karcher-s6-twin-com-3-escovas-122072>. Acesso em: 10 nov. 2020.

KEVERN, J. *et al.* **Pervious Concrete Construction: Methods and Quality Control**. Nashville, Estados Unidos, 2006.

KIM, H. K.; LEE, H. K. Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. **Applied Acoustics**. v. 71, p. 607-615, fev./mar., 2010.

KNAPTON, J.; COOK, IAN D. **Permeable paving for a new container handling area at Santos Container Port, Brazil**. In: 6th International Conference on Concrete Block Paving. Tokyo – Japan, 2000.

KORAT, L. *et al.* Draining capability of single-sized pervious concrete. (Report). **Construction and Building Materials**. p. 252-260, 2018.

LAMB, G.S. **Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. p.66.

LEGONDE, C. K. *et al.* **Problemas causados pela impermeabilização do solo devido à urbanização.** In: XXVIII Seminário de Iniciação Científica. Salão do conhecimento. 2020. Anais... Panambi, 2020. 5 p.

LEMING, L.; MALCOM, H.; TENNIS, D. **Hydrologic design of pervious concrete.** Portland Cement Association, 2007. 72 p.

LI, J. **Mix Design of Pervious Recycled Concrete.** GeoHunan International Conference – Material Design, Construction, Maintenance, and Testinf of Pavements. V. 195, n. 15, p. 103–108, Ago. 2009.

LIAN, C. *et al.* **The Properties of Porous Concrete.** Tese de doutorado. Austrália, 2011.

LIBERATI, A. *et al.* The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. **Journal of clinical epidemiology**, v. 62, n. 10, p. e1-e34, 2009.

LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. Field data for heat island mitigation by pervious concrete in Porto Alegre. In: **Proceedings of the 3rd International Conference on Best Practices for Concrete Pavements.** IBRACON, 2015, 11p.

MACÊDOA, A. *et al.* Study of the physical and mechanical properties of permeable concrete with the addition of TiO₂ for the treatment of sewage. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v.13, no. 5, p. 1, mar. 2020.

MARCHIONI, M.; OLIVEIRA, C. **Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas.** São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 2010. 24p. Disponível em: http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/files_mf/Cartilha_Pav_Intertravado_Permeavel_v1.pdf. Acesso em: 23 set. 2019.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. **Conceitos e requisitos para pavimentos intertravado permeável.** Inovação e sustentabilidade, [São Paulo], [2016]. 8 p. Disponível em: <http://www.oterpren.com.br/site/reportagens/Conceitos%20e%20Requisitos%20para%20Pavimento%20Intertravado%20Perme%C3%A1vel.pdf>. Acesso em: 04 mai 2020.

MARCHIONI, M.; OLIVEIRA, C. **Pavimentos permeáveis: novo enfoque na drenagem urbana.** Vias concretas: pavimentação com sustentabilidade. [2016]. p.1. Disponível em: <http://viasconcretas.com.br/cms/wp-content/uploads/2013/08/RodoviasVias-77-Vias-Concretas.pdf>. Acesso em: 11 out. 2019.

MARCHIONI, M., BECCIU, G., SILVA, C. **Critical analysis of the Brazilian national standard for concrete permeable pavement.** Ecosystems and Sustainable Development X. WIT Transactions on Ecology and The Environment, Vol 192, 2015.

MARCHIONI, M. **Projeto Técnico: Pavimento Permeável.** ABCP, Soluções para cidades. 21p. Disponível em: <https://abcp.org.br/download/pavimento-permeavel/>. Acesso em: 02 fev. 2021.

MARQUES, C. Análise das propriedades mecânicas e drenantes do pavimento permeável com adição de materiais alternativos. **IX Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental.** 2018.

MARTINS FILHO, S. *et al.* Characterization of pervious concrete focusing on non-destructive testing. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 3, p. 483–500, 2020.

MAZZONETTO, C. (2011). **Concreto permeável: Alternativa para aumentar a permeabilidade de pavimentos submetidos a cargas reduzidas, sistema demanda cuidados de especificação, instalação e manutenção.** Disponível em: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoestecnicas/13/artigo254488-1.aspx>. Acesso em: 10 mai. 2020.

MAZZUTTI, E. *et al.* Verificação da resistência à compressão simples de blocos intertravados drenantes. Seminário de engenharia Geotecnia do Rio Grande do Sul (Geors), 2019.

MEHTA, P. e MONTEIRO, P. Concrete, Microstructure, Properties and Materials. São Paulo: Ibracon, p. 674. 2008.

MOREIRA, J.; DIAS, J. e REZENDE, M. Utilização dos resíduos de construção e demolição em base de pavimentos na cidade de Uberlândia (MG). **Vias Gerais**. 2007. Disponível em: <http://www.assender.com.br/trabalhos/viasgerais6/9.pdf>. Acessado em 01 de maio de 2011.

MOTTA, R. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduos sólidos da Construção Civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego.** 2005. 160p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

MOTTA, L. **Pavimento permeável: Uma solução sustentável para a pavimentação de vias urbanas.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental. Florianópolis, v.9, n.3, p. 911-933, jul/set.2020.

MOURA, J.; PEIXER, N.; MUNIZ, P. Análise Técnica de Pavimentos Permeáveis: Aspecto Físico, Hidráulico e Manifestações Patológicas. **Mix Sustentável**. v.5, p. 75-84, mar/jun. 2019.

MOURA, T. **Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial em ambientes urbanos.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Brasília, 2005. Disponível em: http://www.dominiopublico.gov.br/pesquisa/DetalheObraForm.do?select_action=&co_obra=144377. Acesso em: 2 mai. 2020.

MULLIGAN, A. **Attainable Compressive Strength of Pervious Concrete Paving Systems.** Dissertação de Mestrado. Florida, Estados Unidos, 2003.

MWASHA, A.; TOTA-MAHARAJ, K.; MONROSE, J. Assessment of the physical characteristics and stormwater effluent quality of permeable pavement systems containing recycled materials. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, n. 4, p. 779–811, 2019.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. Pervious Concrete Contractor Certification. **NRMCA Publication**, Silver Spring, n. 2PPCRT, 2011.

NEITHALATH, N., WEISS, W.J., and OLEK, J. Enhanced Porosity Concrete: Electrical Impedance, Acoustic Absorption, and Hydraulic Permeability. Presented at the ACI Fall Convention, Boston, 2003.

NEVES, J. **Concreto permeável a solução para enchentes**. 2015. Disponível em: <http://blogdonevesja.blogspot.com.br/2015/09/concreto-permeavel-solucao-para.html>. Acesso em: 03 jun. 2020.

NRMCA – NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. **Pervious Concrete Pavement Maintenance and Operations Guide**. Silver Spring, 2015.

NUCASE, **Águas pluviais: técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas: guia do profissional em treinamento: nível 2 e 3**. Belo Horizonte: Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.), 2007. 42p e 52 p.

OLIVEIRA, C.; BECCIU, G.; MARCHIONI, M. Infiltration-Exfiltration System for Stormwater Control: A Full Scale Test. **Proceedings**, v. 48, n. 1, p. 11, 2019.

OLIVEIRA, C. **Pavimento intertravado permeável – conceitos, seção tipo e avaliação de desempenho**. In: *Concreto & Construções*, 54º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Ano XL, 2012, p.29 a 35.

OLIVEIRA, T., *et al.* **Prevenção de enchentes urbanas: uma alternativa sustentável através do uso do concreto permeável**. 2017. Salão do Conhecimento, UNIJUI.

ONEDA, T. **Planos Diretores de Drenagem Urbana: Uma análise comparativa entre planos de países desenvolvidos e em desenvolvimento**. 2018. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.

PAULISTA. **Lei nº 4821, de novembro de 2018: Plano Diretor Participativo de Paulista**. Disponível em: <https://www.paulista.pe.gov.br/site/planodiretor>. Acesso em: 27 set. 2019.

PARKINSON, J. *et al.* **Drenagem Urbana Sustentável no Brasil. Relatório do workshop em Goiânia – GO**. 7 de Maio de 2003. Goiania: CREEA, 2003.

PARISI, S. A. **Análise da capacidade de infiltração para atenuação de alagamento em um ponto crítico na cidade do Recife**. 2019. 151p. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2019.

PAZ, A. R. da. **Hidrologia aplicada**. (notas de aula) Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Caxias do Sul, 2004.

PENG, X. *et al.* Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. **Construction and Building Materials**, v. 138, p. 479-485, jan./fev., 2017.

PINTO, L. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. 283p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PISO GRAMA BERTIOGA. **Pisogramas Bloquetes Intertravados**. [2016]. Disponível em: <http://pisogramabertioga.wixsite.com/pisograma-e-bloquete>. Acesso em: 05 jun. 2020.

POLASTRE, B.; SANTOS, L. **Concreto Permeável**. 2006. Disponível em: www.usp.br. Acesso em: 11 mai. 2021.

PORTO ALEGRE. **Plano Diretor de Drenagem Urbana da Cidade de Porto Alegre**. Porto Alegre: Manual de Drenagem Urbana, Vol VI. Porto Alegre, 2005.

PRÁTICA RECOMENDADA PR-1. **Sistemas Construtivos Pavimentos Permeáveis**. Manutenção de Pavimentos Intertravados Permeáveis. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: https://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2020/08/PR1_Manut_Pav_Permeaveis1.pdf. Acesso em: 10 nov. 2020.

PRÁTICA RECOMENDADA PR-2. **Sistemas Construtivos Pavimentos Permeáveis**. Conceitos e Requisitos para Pavimentos Intertravado Permeável. Disponível em: https://abcp.org.br/wp-content/uploads/2016/01/PR2_Conceitos_requisitos_pav_permeavel.pdf. Acesso em: 05 mar. 2021.

PREFEITURA DO RECIFE. **Emlurb conta com mais duas varredeiras mecânicas para auxiliar na limpeza urbana**. Disponível em: <http://www2.recife.pe.gov.br/noticias/13/02/2014/emlurb-counta-com-mais-duas-varredeiras-mecanicas-para-auxiliar-na-limpeza-urbana>. Acesso em: 10 de nov. 2020.

RAHMAN, M.; RAHMAN, A.; KURUPPU, U. Permeable pavement as a stormwater best management practice: a review and discussion. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 10, p. 1–20, 2019.

RAHMAN, M. *et al.* Recycled construction and demolition materials in permeable pavement systems: geotechnical and hydraulic characteristics. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 183-194, nov., 2015.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S. A Review of Permeable Pavement Clogging Investigations and Recommended Maintenance Regimes. **Water**. v. 10, 2018.

RECIFE. **Lei nº 16.176, de 09 de abril de 1996**: Estabelece a Lei de Uso e Ocupação do Solo da Cidade do Recife. Disponível em: <http://www.legiscidade.recife.pe.gov.br/lei/16176/>. Acesso em: 26 set. 2019.

RECIFE. **Lei complementar nº 2, de 23 de abril de 2021**: Institui o Plano Diretor do Município do Recife. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/plano-diretor-recife-pe>. Acesso em: 26 mai. 2021.

RECIFE. **Lei nº 18.011, 28 de abril de 2014**: Dispõe sobre a Política de Sustentabilidade e de enfrentamento das mudanças climáticas do Recife e dá outras providências. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/pe/r/recife/lei-ordinaria/2014/1801/18011/lei-ordinaria-n->

18011-2014-dispoe-sobre-apolitica-desustentabilidade-e-de-enfrentamento-das-mudancas-climaticas-do-recife-e-da-outras-providencias. Acesso em: 21 mai. 2020.

RECIFE. **Lei nº 18.112, 12 de janeiro de 2015:** Dispõe Sobre a Melhoria da Qualidade Ambiental das Edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "Telhado Verde", e Construção de Reservatórios de Acúmulo ou de Retardo do Escoamento das Águas Pluviais para a Rede de Drenagem e dá outras providências. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a1/pe/r/recife/lei-ordinaria/2015/1812/18112/lei-ordinaria-n-18112-2015-dispoe-sobre-a-melhoria-da-qualidade-ambiental-das-edificacoes-por-meio-da-obrigatoriedade-de-instalacao-do-telhado-verde-e-construcao-de-reservatorios-de-acumulo-ou-de-retardo-doescoamento-das-aguas-pluviais-para-a-rede-de-drenagem-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 21 mai. 2020.

RECIFE. **Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais do Recife.** Recife: 2016.

RENTAL, M. **Asfalto sustentável: conheça novas soluções para a pavimentação.** Disponível em: <https://masonrental.com.br/blog/asfalto-sustentavel-conheca-novas-solucoes-para-a-pavimentacao/>. Acesso em: 22 jan. 2021.

RIBAS, L. **Experimentação e modelagem do comportamento hidrodinâmico de um pavimento permeável.** 2017. 125 p. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 2017.

RIO DE JANEIRO. **Decreto nº 23.940, 30 de janeiro de 2004:** Torna obrigatório, nos casos previstos, a adoção de reservatórios que permitam o retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem. Disponível em: <https://cm-rio-de-janeiro.jusbrasil.com.br/legislacao/917561/decreto-23940-04>. Acesso em: 21 mai. 2020.

RODDEN, R.; G., VOIGT; SMITH, T. Structural and Hydrological Design of Sustainable Pervious Concrete Pavements. In: **Annual Conference of the Transportation Association of Canada**, Edmonton, Alberta, 2011.

SALES, T. L. **Pavimento permeável com superfície em blocos de concreto de alta porosidade.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. p.188.

SANDBERG, U.; EJSMONT, J. *Tyre / Road noise reference book*, Informex, Kisa, Sweden, 2002.

SANTOS, E. M. A., *et al.* Análise da viabilidade econômica de implantação de pavimento permeável como instrumento de drenagem urbana nas vias mais alagadas do município de Nova Xavantina-MT. **Revista Interação Interdisciplinar.** 2019. UNIFIMES - Centro Universitário de Mineiros, v. 03, n. 02, p. 62-77, jul.- dez., 2019.

SÃO PAULO. **Plano Diretor da Cidade de São Paulo.** São Paulo: Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais, Vol1. São Paulo, 2012.

SÃO PAULOSÃO. 2018. Disponível em: <https://saopaulosao.com.br/conteudos/outros/3898-relat%C3%B3rio-da-onu-faz-proje%C3%A7%C3%B5es-sobre-as>

transforma%C3%A7%C3%B5es-do-mundo-urbano-at%C3%A9-2050.html. Acesso em: 12 mar. 2021.

SÃO PAULO. **Lei nº 16.642, 09 de maio de 2017:** Aprova o código de obras e edificações do Município de São Paulo. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/lei-ordinaria/2017/1664/16642/lei-ordinaria-n-16642-2017-aprova-o-codigo-de-obras-e-edificacoes-do-municipio-de-sao-paulo-introduz-alteracoes-nas-leis-n-15150-de-6-de-maio-de-2010-e-n-15-764-de-27-de-maio-de-2013>. Acesso em: 22 mai. 2020.

SÃO PAULO. **Lei nº 13.293, 14 de janeiro de 2002:** Dispõe sobre a criação das "Calçadas Verdes" no Município de São Paulo, e dá outras providências. Disponível em: <http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/lei-13293-de-14-de-janeiro-de-2002>. Acesso em: 22 mai. 2020.

SCHUCHTER JÚNIOR, L.; MIRANDA, D. Análise de Sensibilidade de Parâmetros Hidrológicos com a Utilização de Pavimentos Intertravados em Bacias Urbanas – Estudo de Caso da Bacia do Córrego do Leitão em Belo Horizonte/Minas Gerais. **Revista Petra**. v. 2, n. 1, p. 17-35, jan./jul. 2016.p.5.

SCHUELER, T. **Controlling urban runoff: a practical manual for planning and designing urban BMPs**. Washington: Washington Metropolitan Water Resources Planning Board, 1987.

SENÇO, Wlastermiler de. Manual de Técnicas de Pavimentação, vol.1. São Paulo: Pini, 1997.

SHACKEL, B., MYERS, B., PEARSON, A., 2010. **Experience in the application of permeable interlocking concrete paving in Australia**. Concrete in Australia, Vol 36 No 2. Pp 45-50.

SILVA, A. **Análise da viabilidade financeira da implantação de estruturas de pavimento permeável no estacionamento da Escola Politécnica (POLI/UPE)**. 2017. Monografia - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2017. p. 131.

SILVA, A.C. **Modelagem hidrológica-hidráulica para atenuação de alagamentos no entorno da Escola Politécnica de Pernambuco**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2018. p.103.

SILVA, A.; SILVA JUNIOR, M.; SANTOS, C. Sustentabilidade na construção civil: um panorama dos dispositivos legais vigentes e das práticas adotadas na cidade do Recife-PE. *In:* FAAP – FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA, 14., 2018, São Paulo. **Anais [...]**. Disponível em: <http://www.eventoanap.org.br/eventos/paginas/evento/12/pagina/anais>. Acesso: 22 abr. 2019.

SILVA, C.; SANTIAGO, A. Urbanização e inundações: conflitos e possibilidades. **Paisagem Ambiente:** ensaios, São Paulo, n. 24, p. 327 – 334, 2007.

SILVA JUNIOR, M. **Alternativas compensatórias para controle de alagamentos em localidade do Recife-PE**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015. p.28.

SILVA, M. Determinação do coeficiente de permeabilidade de elementos drenantes de concreto. **Organizações e Sociedade**, v. 7, n. 8, p. 4, 2018.

SILVA, R.; MOURA, E. Drenagem Urbana Sustentável, 14. SILVA, E. R.; SILVA, S. R. [Orgs.]. **Sustentabilidade urbana**. Recife: EDUPE, p. 86, 2017. 254p.

SOUSA, N. **Importância das praças na gestão dos recursos hídricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2019. p.85.

STORCK, F. **Avaliação da influência de pavimentos permeáveis no amortecimento de vazões de escoamento de águas pluviais em um condomínio em Curitiba (PR)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2017.

TASCHETTO, M. A. **Análise de sistemas de blocos intertravados no auxílio à drenagem urbana**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI). Frederico Westphalen, RS, 2017.

TÉCHNE, 2010. Disponível em: https://www.ufjf.br/pauvi/files/2019/03/ESTACIONAMENTO-PARQUE-QUALIFICACAO_PAISAGISTICA.pdf. Acesso em: 12 mar. 2021.

TENNIS, P.D.; LEMING, M.L.; AKERS, D.J. **Pervious concrete pavements**. Technical report, EB302.02. Portland Cement Association, Skokie, Illinois, and National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, 2004, 32p.

TOMAZ, P. **Pavimento Poroso**. Curso de Manejo de Águas Pluviais. 2009. TRUEGRIDPAVER. Disponível em: <https://www.truegridpaver.com/products/truegrid-pro-lite/>. Acesso em: 15 jan. 2021.

TUCCI, C. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 7, n.1, p. 5-27, 2002.

TUCCI, C. Drenagem Urbana. **Ciência e Cultura**. v.55, n.4, 2003. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400020. Acesso em: 17 abr. 2020.

UNITED NATIONS, 2009. Disponível em: <http://www.un.org/esa/population/publications/wup2007/.2007>. Acesso em: 28 nov. 2019.

VIDAL, A. **Caracterização de concreto permeável produzido com agregados reciclados de construção e demolição para utilização em pavimentação permeável em ambiente urbano**. 2014. Dissertação (Mestrado do Programa de Engenharia Urbana) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014, 132p.

VILLAÇA, F. **A ilusão do Plano Diretor**. São Paulo, Galeria de Artigos de Professores USP. 2005. Disponível em: http://www.flaviovillaca.arq.br/pdf/ilusao_pd.pdf. Acesso em: 05 mai. 2020.

VILLANUEVA, A. *et al.* Gestão da drenagem urbana, da formulação à implementação.

Revista de Gestão de Água da América Latina - Rega, v. 8, n. 1, p. 5-18, 2011. Disponível em: <http://rhama.com.br/blog>. Acesso em: 15 abr. 2020.

VIRGILIIS, A. **Procedimento de Projeto e Execução de Pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheia**, s.l.: USP- Biblioteca Digital. São Paulo, SP 2009. 191p. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-08092010-122549/pt-br.php>. Acesso em: 02 jan. 2020.

VRAČEVIĆ, M. *et al.* Wearing characteristics assessment of pervious concrete pavements. **Road Materials and Pavement Design**, v. 20, n. 3, p. 727–739, 2018.

WRIGHT, L. T.; HEANEY, J. P. Design of distributed stormwater control and re-use systems. In: **Stormwater Collection systems Design Handbook**. McGraw-Hill. 2004. Chap. 11 – Design of distributed stormwater control and re-use systems. Disponível em: <http://www.digitalengineeringlibrary.com>. Acesso em: 11 dez. 2020.

YAMIN, R.A. *et al.* Advanced properties of continuously graded pervious concrete for rigid pavement base layer. **International Journal of Engineering and Technology Innovation**, v. 9, n. 2, p. 91–107, 2019.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete Pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v.33, Beijing, China, 2002, p.381-386.

YAZAKI, L. *et al.* **Projeto Técnico: Jardins de Chuva. Soluções para Cidades**. 2013. Disponível em: http://solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/04/AF_Jardins-de-Chuva-online.pdf. Acesso em: 01 abr. 2020.

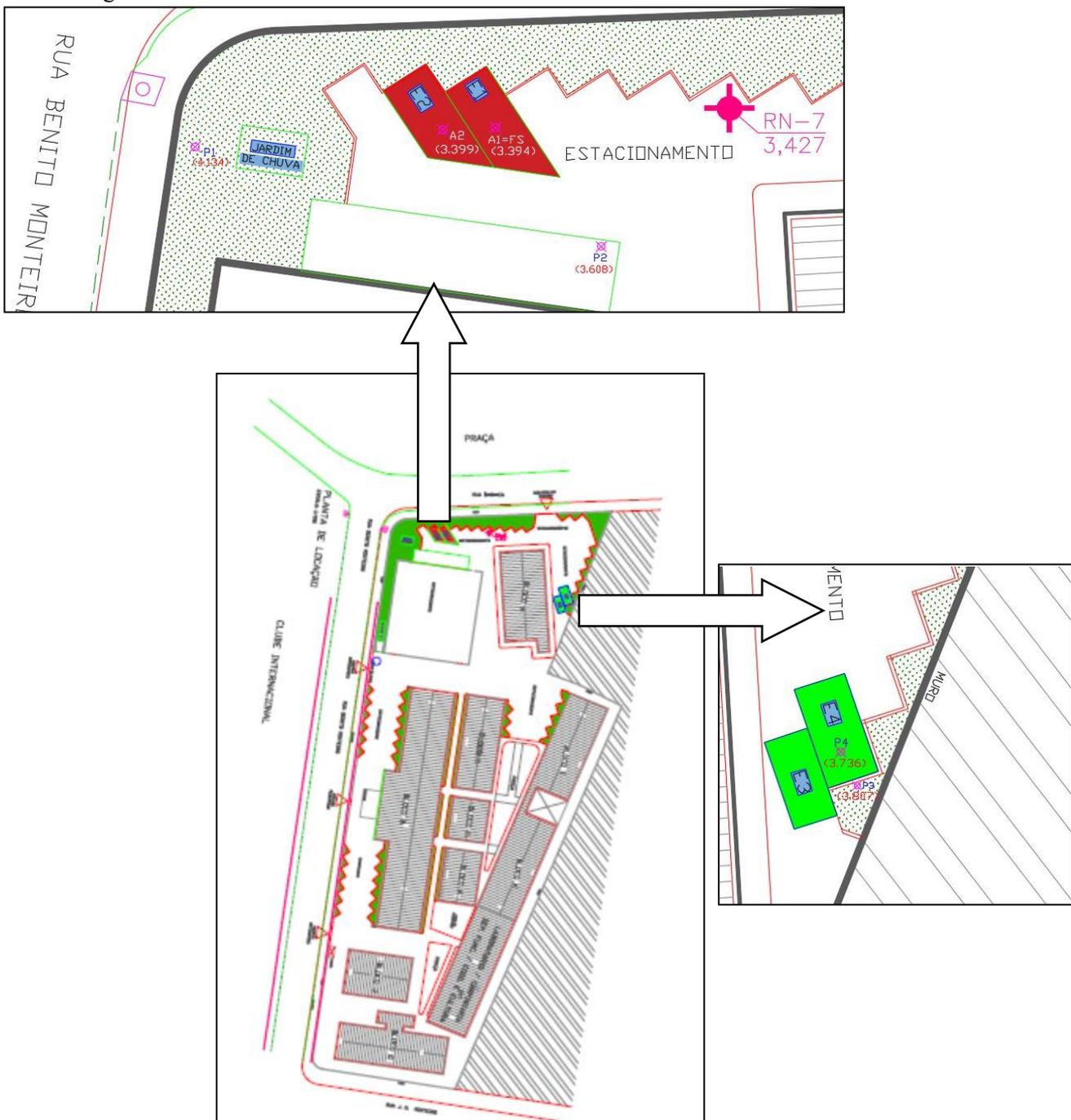
ZHONG, R.; WILLE, K. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 51-60, ago., 2015.

ZVONARIĆ, M., *et al.* Influence of clogging and unbound base layer properties on pervious concrete drainage characteristics. **Materials**, v. 13, n. 11, 2020.

APÊNDICE A - Planta baixa do estacionamento da POLI/UPE.

A planta baixa (Figura 85) apresentada mostra a locação: do furo de sondagem (FS), das vagas de estacionamento onde foram implantadas as pistas experimentais das estruturas de pavimentos permeáveis estudadas (E1, E2, E3 e E4) e dos piezômetros (P1,P2, P3, P4, A1 e A2).

Figura 85 – Planta baixa do estacionamento da POLI/UPE.



Fonte: Autora (2021).

APÊNDICE B - Planta da Bacia de contribuição.

A Planta (Figura 86) apresenta a bacia de contribuição (Área=100m²) adotada no cálculo do dimensionamento hidráulico das estruturas de pavimento (E1 e E2).

Figura 86 – Planta da Bacia de contribuição.

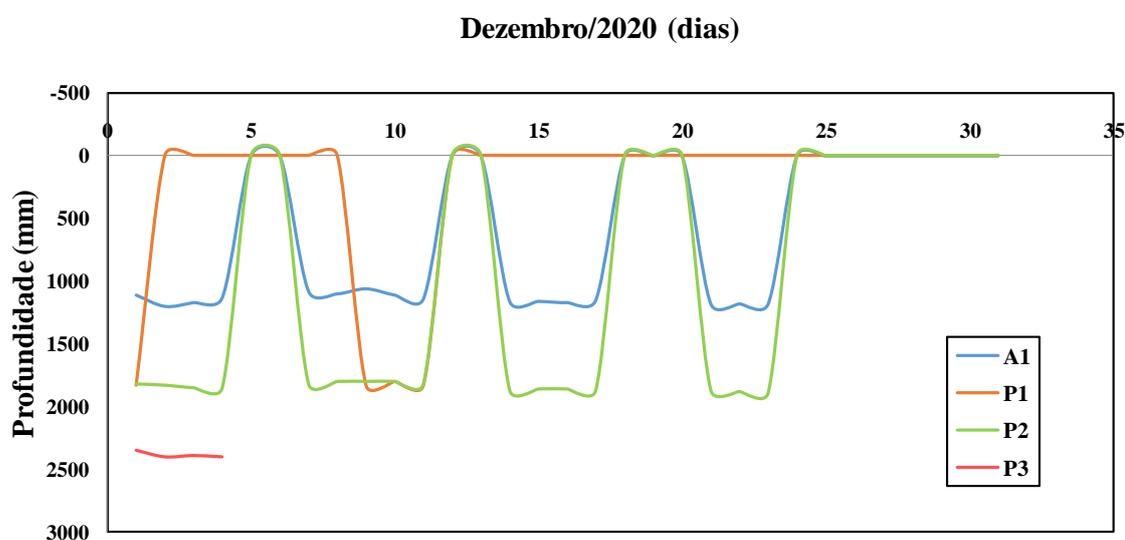


Fonte: Autora (2021).

APÊNDICE C - Monitoramento do Lençol Freático e dados de precipitação.

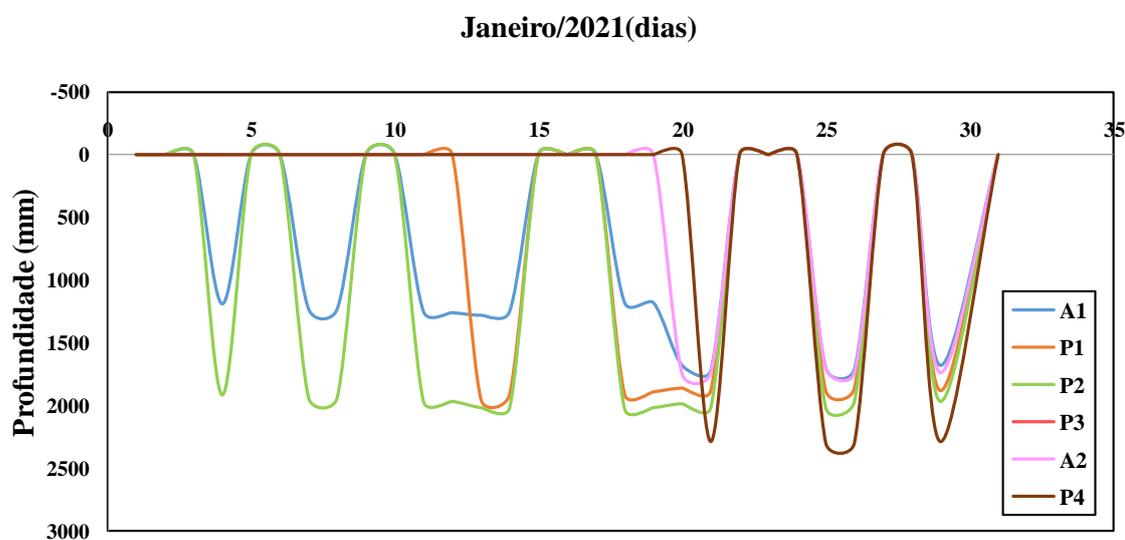
As Figura 87, Figura 88, Figura 89, Figura 90, Figura 91 e Figura 92 apresentam o monitoramento do lençol freático realizado no período de Dezembro/2020 a Maio/2021. Vale ressaltar que as medições não foram realizadas em todos os dias do mês, sendo assim justifica-se o fato do valor da profundidade estar zerada em alguns dias.

Figura 87 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Dezembro (2020).



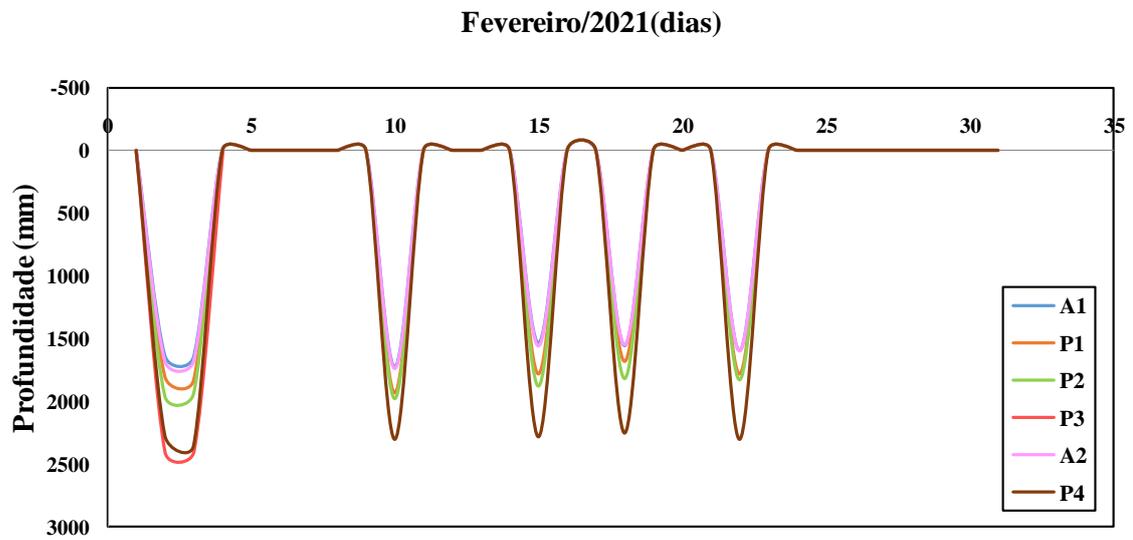
Fonte: Autora (2021).

Figura 88 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Janeiro (2021).



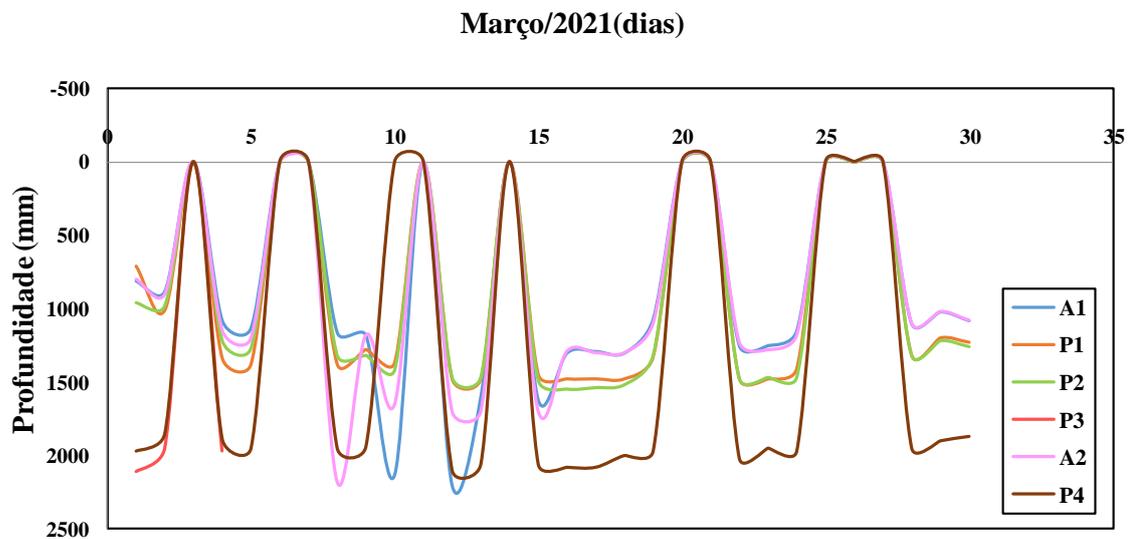
Fonte: Autora (2021).

Figura 89 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Fevereiro (2021).



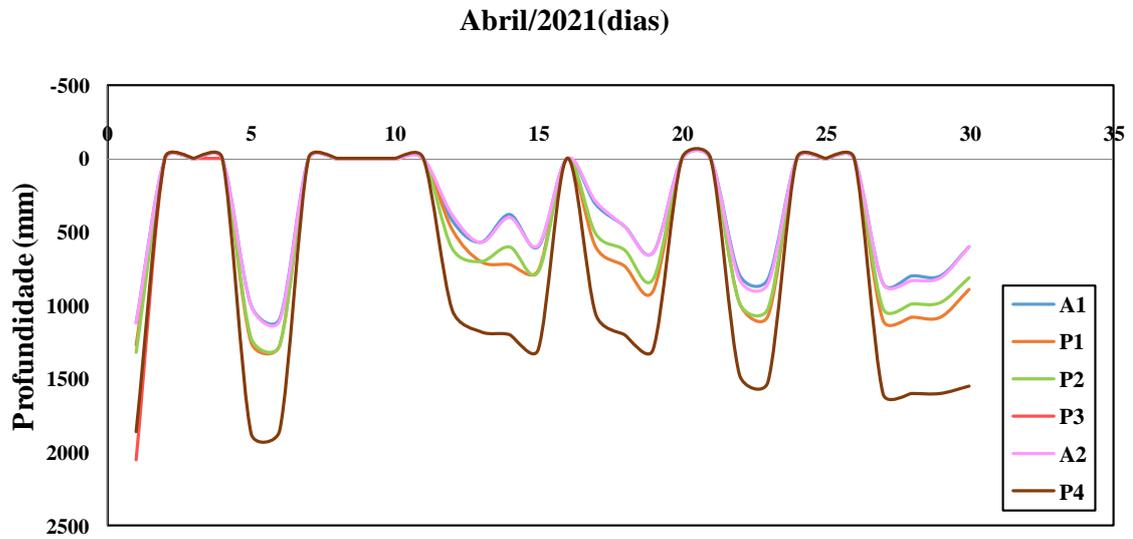
Fonte: Autora (2021).

Figura 90 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Março (2021).



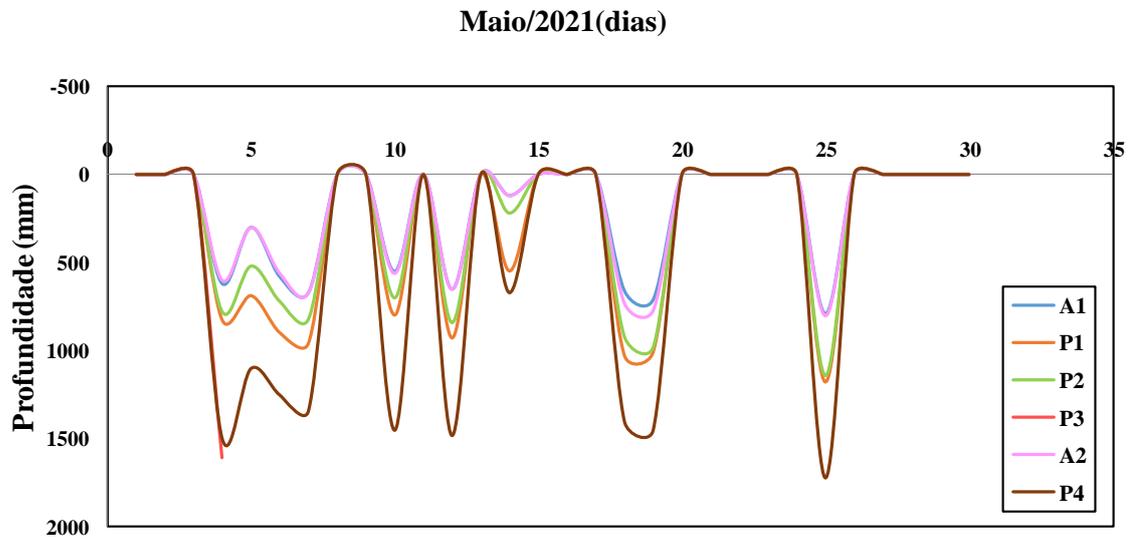
Fonte: Autora (2021).

Figura 91 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Abril (2021).



Fonte: Autora (2021).

Figura 92 – Gráfico do Monitoramento do Lençol Freático Maio (2021).



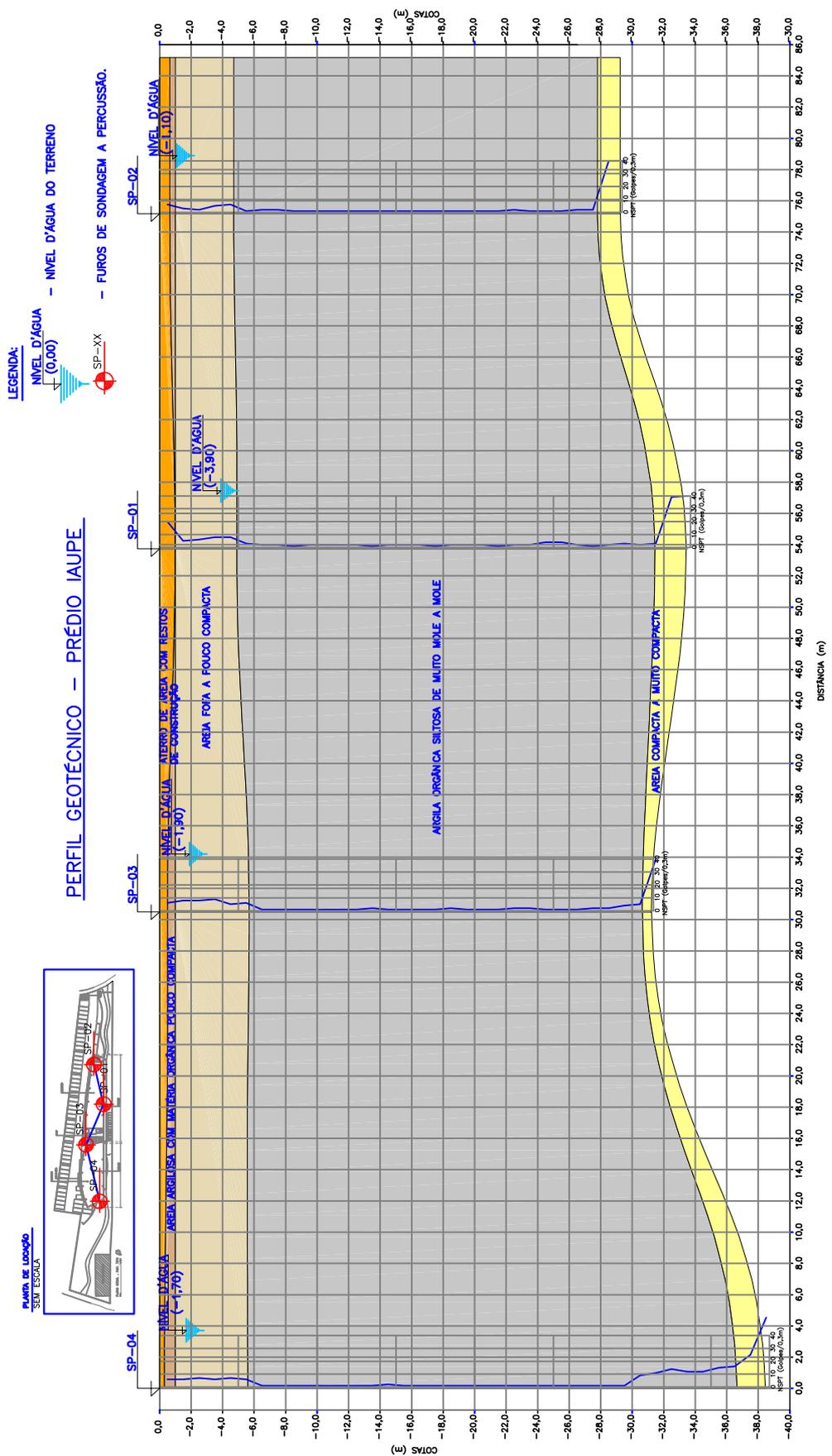
Fonte: Autora (2021).

A Tabela 35 apresenta os dados de precipitação coletados da estação Torreão do CEMADEN para o período do monitoramento do Lençol Freático.

Tabela 35 – Dados mensais de precipitação (Dezembro/2020 a Maio/2021).

MÊS	PRECIPITAÇÃO (mm)
Dezembro (2020)	32,23
Janeiro (2021)	47,58
Fevereiro (2021)	90,55
Março (2021)	181,62
Abril (2021)	471,75
Maio (2021)	547,16

Fonte: Autora (2021).



OBRA

PRÉDIO IAUPE

CLIENTE
 UPE- UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO

PRANCHA N°
 01

LOCAL
 RUA BENFICA, MADALENA, RECIFE/PE

REVISÃO
 0

PROJETO
 ESTUDO DE PROSPECÇÃO GEOTÉCNICA

DATA
 JUNHO/2013

TÍTULO
 PERFIL GEOTÉCNICO

ESCALA
 SEM ESCALA

ANEXO 1 - Perfil Geotécnico do prédio IAUPE