



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

**LUCAS AMORIM AMARAL MENEZES**

**UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL COMO ALTERNATIVA  
COMPENSATÓRIA PARA DRENAGEM URBANA**

Recife, PE  
2023



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

**LUCAS AMORIM AMARAL MENEZES**

**UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL COMO ALTERNATIVA  
COMPENSATÓRIA PARA DRENAGEM URBANA**

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

Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Recife, PE  
2023

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

M543u Menezes, Lucas Amorim Amaral  
Utilização de pavimento permeável como alternativa  
compensatória para drenagem urbana. / Lucas Amorim  
Amaral Menezes. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2023.

138 f. il.

Orientador: Prof. Dr. Jaime J. da Silva Pereira Cabral

Dissertação (Mestrado – Construção Civil) Universidade de  
Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2023.

1. Técnicas Compensatórias. 2. Infiltração. 3.  
Pavimentos Permeáveis. 4. Desempenho Hidráulico. 5.  
Manejo de Águas Pluviais. I. Construção Civil –  
Dissertação. II. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira  
(orient.). III. Universidade de Pernambuco, Escola  
Politécnica, Mestrado em Construção Civil. IV. Título


CDD: 690.028

**LUCAS AMORIM AMARAL MENEZES**

**UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTO PERMEÁVEL COMO  
ALTERNATIVA COMPENSATÓRIA PARA DRENAGEM  
URBANA**

**BANCA EXAMINADORA:**


**Orientador(a)**

Documento assinado digitalmente  
 **JAIME JOAQUIM DA SILVA PEREIRA CABRAL**  
Data: 18/10/2023 00:02:18-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---


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

**Examinadores(as)**

Documento assinado digitalmente  
 **YEDA VIEIRA POVOAS**  
Data: 10/10/2023 13:55:00-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Profa. Dra. Yêda Vieira Póvoas  
Universidade de Pernambuco

Documento assinado digitalmente  
 **ARTUR PAIVA COUTINHO**  
Data: 10/10/2023 19:51:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho  
Universidade Federal de Pernambuco

Documento assinado digitalmente  
 **RUTINEIA TASSI**  
Data: 05/10/2023 22:14:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Profa. Dra. Rutineia Tassi  
Universidade Federal de Santa Maria

Recife-PE  
2023

## DEDICATÓRIA

Para aquela que nunca mediu esforços para a minha educação em todos os níveis e que é a principal responsável pela minha formação enquanto ser humano, minha mãe, Marta Amorim Leandro.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por guiar meus passos e me conceder saúde e proteção para seguir a vida. À minha mãe, Marta, por tudo que sempre fez e faz por mim e por meus irmãos mais velhos Mariana e Felipe. À minha noiva, Tatiana, por tanto apoio, incentivo e carinho, inclusive nos dias mais difíceis estando sempre junto a mim e sendo a pessoa que escolhi para trilhar tudo comigo através da cumplicidade. Aos meus irmãos, Mariana, pelo amor e cuidado comigo desde sempre se apresentando praticamente como minha segunda mãe, e Felipe, principalmente pelo exemplo e referência que sempre foi e continua sendo.

Aos meus sobrinhos Alice, Davi, Camila e Letícia, por serem a minha fonte mais pura de amor e que representam para mim alegria e felicidade a qualquer momento em que penso neles. Ao meu pai, Luiz, por tantos momentos de carinho e amizade. Aos meus tios e meus primos por tantas experiências e trocas que tanto me enriquecem. Aos meus cunhados, Victor e Renata por completarem a minha família de uma forma única e especial.

Ao meu orientador, professor Jaime Cabral, por toda orientação, disponibilidade e humildade ao repassar o seu conhecimento. À professora Yêda Póvoas pelo conhecimento repassado, palavras de incentivo, atenção destinada e disponibilidade em participar como examinadora desta pesquisa, agradecimento este extensivo ao professor Artur Coutinho e a professora Rutinéia Tassi.

A todos os meus amigos, especialmente às amizades construídas através dos esportes que pratico, vôlei e basquete. Aos colegas do mestrado que puderam compartilhar algo comigo durante esse período, aos laboratoristas Lorena e Fábio e ao professor Jonas pela ajuda e troca de informações que me ajudaram no projeto. A todas as pessoas que pensaram positivamente para que essa pesquisa se concretizasse.

*“Nada a temer senão o correr da luta”*

Milton Nascimento

## RESUMO

O acelerado processo de urbanização nas últimas décadas altera a organização populacional mundial e acarreta modificações nas cidades com o aumento dos riscos às condições de vida e ao meio ambiente. O gerenciamento das águas e a drenagem urbana com as suas soluções clássicas baseadas no conceito sanitário-higienista necessitam ser revistos. Assim, surgiram as soluções alternativas ou compensatórias que têm conceitos sustentáveis visando um equilíbrio entre reter e drenar a água, remodelando o sistema de drenagem para adaptação aos hidrogramas de cheias mais rápidos e mais críticos, com o objetivo de reduzir os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico. Dentre as medidas compensatórias de infiltração que objetivam amenizar os impactos dos aumentos das áreas impermeáveis, da vazão máxima e da magnitude das inundações, estão os pavimentos permeáveis. Este estudo objetivou analisar a viabilidade de um pavimento permeável experimental em uma área de pedestres da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI-UPE), avaliando seu comportamento hidráulico no aumento dos volumes infiltrados, diminuição das vazões de pico e consequente mitigação dos alagamentos urbanos. O pavimento permeável experimental teve seu perfil prévio definido em 43cm, sendo 8cm do revestimento, 5cm da camada de assentamento e 30cm da camada de base, utilizando-se manta geotêxtil não tecido nas interfaces da base com a camada de assentamento e da base com o subleito, buscando reduzir a colmatação (entupimento devido ao carreamento de finos). A metodologia proposta seguiu as etapas de caracterização do subleito; realização dos ensaios de caracterização dos materiais componentes das camadas do pavimento e a verificação de atendimento aos requisitos propostos pela ABNT NBR 16416 (2015), norma relativa à pavimentação permeável; dimensionamento mecânico e hidráulico; monitoramento dos níveis de água do lençol freático local e avaliação do desempenho hidráulico do pavimento permeável, com a realização dos ensaios de permeabilidade, simulações hidráulicas de lâmina superficial de precipitação e avaliação de dados contínuos de precipitações reais e nível d'água do sistema permeável. Os resultados encontrados indicaram um solo de subleito de boa qualidade em função da sua permeabilidade e boa capacidade de suporte de cargas. O material utilizado na base do pavimento (brita 19mm) apresentou conformidade em todas as propriedades indicadas pela ABNT NBR 16416 (2015), inclusive na granulometria. Em contrapartida, o pó de pedra utilizado na camada de assentamento não apresentou conformidade, em função de ser mais fino do que deveria. Os blocos intertravados de concreto permeável do revestimento apresentaram ausência de defeitos no concreto, mas uma resistência média à compressão de 10,68MPa, inferior aos 20MPa que preconiza a norma, no entanto, os fatores fora dos parâmetros normatizados não influenciaram negativamente o uso do pavimento para o período analisado de fevereiro à abril de 2023. Quanto ao desempenho hidráulico, o pavimento experimental apresentou alto coeficiente de permeabilidade recém construído de  $3,26 \times 10^{-3}$  m/s, e bom desempenho às simulações hidráulicas de chuvas intensas de 121,95mm e 211,64mm, respondendo positivamente durante os ensaios e na recuperação para a condição anterior às simulações. Nas avaliações dos eventos chuvosos o pavimento conseguiu infiltrar volumes totais de água em torno de 2000 litros numa área de 27m<sup>2</sup>. Como conclusão, o pavimento permeável experimental apresentou-se como uma satisfatória técnica compensatória de infiltração, reduzindo o escoamento superficial e os volumes totais escoados por permitir a infiltração com potencial para mitigar os alagamentos urbanos.

**Palavras-chave:** Técnicas compensatórias. Infiltração. Pavimentos permeáveis. Desempenho hidráulico. Manejo de águas pluviais.



## ABSTRACT

### USE OF PERMEABLE PAVEMENT AS A COMPENSATORY ALTERNATIVE FOR URBAN DRAINAGE

The accelerated process of urbanization in recent decades changes the global population organization and leads to changes in cities, increasing risks to living conditions and the environment. Water management and urban drainage with its classic solutions based on the sanitary-hygienist concept need to be reviewed. Thus, alternative or compensatory solutions have emerged that have sustainable concepts aiming at a balance between retaining and draining water, remodeling the drainage system to adapt to faster and more critical flood hydrographs, with the aim of reducing the impacts of urbanization on the hydrological cycle. Among the infiltration compensatory measures that aim to mitigate the impacts of increases in impervious areas, maximum flow and magnitude of floods, are permeable pavements. This study aimed to analyze the feasibility of an experimental permeable pavement in a pedestrian area at the Polytechnic School of Pernambuco (POLI-UPE), evaluating its hydraulic behavior in increasing infiltrated volumes, decreasing peak flows and consequent mitigation of urban flooding. The experimental permeable pavement had its previous profile defined at 43cm, being 8cm from the coating, 5cm from the laying layer and 30cm from the base layer, using a non-woven geotextile blanket at the interfaces of the base with the laying layer and the base with the subgrade, seeking to reduce clogging (clogging due to the carriage of fines). The proposed methodology followed the subgrade characterization steps; carrying out characterization tests on the materials that make up the pavement layers and verifying compliance with the requirements proposed by ABNT NBR 16416 (2015), a standard relating to permeable paving; mechanical and hydraulic sizing; monitoring water levels in the local water table and evaluating the hydraulic performance of the permeable pavement, by carrying out permeability tests, hydraulic simulations of surface precipitation levels and evaluation of continuous data on real precipitation and water level in the permeable system. The results found indicated a good quality subgrade soil due to its permeability and good load-bearing capacity. The material used at the base of the pavement (19mm gravel) was in compliance with all properties indicated by ABNT NBR 16416 (2015), including granulometry. On the other hand, the stone dust used in the laying layer did not comply, as it was finer than it should be. The interlocking permeable concrete blocks of the coating showed no defects in the concrete, but an average compressive strength of 10,68MPa, lower than the 20MPa recommended by the standard, however, factors outside the standardized parameters did not negatively influence the use of the pavement for the period analyzed from February to April 2023. Regarding hydraulic performance, the experimental pavement presented a high newly constructed permeability coefficient of  $3,26 \times 10^{-3}$  m/s, and good performance in hydraulic simulations of intense rainfall of 121,95mm and 211,64mm, responding positively during the tests and in the recovery to the condition prior to the simulations. In the evaluations of rainy events, the pavement managed to infiltrate total volumes of water of around 2000 liters in an area of 27m<sup>2</sup>. In conclusion, the experimental permeable pavement presented itself as a satisfactory infiltration compensatory technique, reducing surface runoff and the total volumes drained by allowing infiltration with the potential to mitigate urban flooding.

**Keywords:** Compensatory techniques. Infiltration. Permeable pavement Hydraulic performance. Rainwater management.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Hidrogramas das áreas urbanizada e rural .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 2 - Alguns aspectos problemáticos relativos à drenagem urbana.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 3 - Cenários avaliativos do aumento da urbanização e os efeitos sobre o ciclo hidrológico.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 4 - Cidade de São Paulo nas primeiras décadas do século XX.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 5 - Brasil Higienista, cidade de Recife (PE) em 2021 .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 6 - Síntese temporal das fases do desenvolvimento das águas urbanas .....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 7 – Jardim de chuva em Nova York, EUA.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 8 – Comparação da pavimentação convencional (direita) e a pavimentação permeável com blocos de concreto (esquerda).....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 9 – Perfil esquemático do pavimento permeável.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 10 – Número de estudos por bases de dados. Engineering Village (A); Scopus (B); Science Direct (C); Web of Science (D) .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 11 - Aplicações de pavimentos com revestimento intertravado permeável .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 12 – Sistema de infiltração total.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 13 - Sistema de infiltração parcial .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 14 – Sistema sem infiltração .....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 15 - Tipos de materiais utilizados nos pavimentos permeáveis.....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 16 – Fluxograma esquemático do projeto de um pavimento permeável.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 17 – Etapas da metodologia.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 18 – Localização da POLI-UPE em Mapa .....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 19 – Projeto de reforma na POLI – Recorte com a área de estudo.....</b>	<b>60</b>
<b>Figura 20 – Precipitação média mensal em Recife-PE, no período de 1994 a 2022 .....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 21 - Perfil do pavimento experimental.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 22 – Fluxograma das etapas de caracterização do solo da área experimental ....</b>	<b>64</b>
<b>Figura 23 – Perfil geotécnico da POLI-UPE .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 24 - Sondagem investigativa do nível do lençol freático local. Perfuração com o trado manual (a), retirada do trado com material (b), aferição do nível d'água do lençol freático (c).....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 25 - Amostra de solo quarteada (a) e subdivisões amostrais (b).....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 26 - Realização do ensaio de granulometria. Preparação (a), sedimentação (b), peneiramento grosso (c) e peneiramento fino (d) .....</b>	<b>68</b>

<b>Figura 27 - Ensaio de compactação. Colocação gradativa da água (a), homogeneização do material (b), cilindro e disco espaçador (c), soquete e compactação (d) .....</b>	<b>69</b>
<b>Figura 28 – Ensaio ISC (CBR). Preparação do corpo de prova (a), colocação em tanque de submersão (b), penetração na prensa (c).....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 29 – Ensaio de permeabilidade à carga constante. Preparação do permeâmetro (a), permeâmetro (b), sistema de carga constante (c), coleta do volume com marcação do tempo (d).....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 30 – Ensaio de permeabilidade em campo. Infiltrômetro (a), nivelamento e copos com os volumes a serem vertidos na realização do ensaio (b) .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 31 – Fluxograma da caracterização e requisitos das camadas do pavimento .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 32 – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório: amostra do material da base (a), quarteador mecânico (b), amostras reduzidas (c) .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 33 - Ensaios realizados para a camada de base.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 34 - Ensaios realizados para a camada de assentamento .....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 35 – Ensaios nos blocos de concreto permeável. Avaliação dimensional (a), inspeção visual (b), resistência à compressão (c), coeficiente de permeabilidade (d).....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 36 – Dimensionamento - Método da prefeitura municipal de São Paulo.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 37 – Perfil do piezômetro PZ1.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 38 – Equipamento manual de medição de nível d'água (a), indicação do sensor (b) .....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 39 - Piezômetros instalados na área do módulo experimental.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 40 - Localização dos piezômetros. Área onde se encontra o módulo experimental e os piezômetros PZ02, PZ03, PZN01, PZN02, PZN03, PZN04 (a), recorte da área de entrada da POLI-UPE onde se localiza o piezômetro PZ01 (b).....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 41 – Determinação do coeficiente de permeabilidade do pavimento permeável. Volumes de água separados e anel de infiltração vedado com massa de calafetar(a), execução do ensaio(b) .....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 42 – Área dos ensaios de simulação hidráulica. Área total do módulo experiental com 27m<sup>2</sup> (a), área reduzida com 9,45m<sup>2</sup> (b).....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 43 – Medidor de nível d'água automático. Datalogger (a), conjunto AMPEQ (b) .....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 44 - Curva granulométrica do solo do subleito .....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 45 - Classificação do solo - Triângulo textural .....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 46 - Curva de compactação – Energia de proctor normal .....</b>	<b>95</b>

<b>Figura 47 – Ensaio ISC – Pressão X penetração .....</b>	<b>96</b>
<b>Figura 48 - Curvas de infiltração - Solo do subleito.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 49 - Infiltração acumulada X tempo.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 50 - Distribuição horária da precipitação do dia 28/05/2022 em Recife .....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 51 – Realização da medição do nível d’água com o equipamento manual .....</b>	<b>108</b>
<b>Figura 52 – Monitoramentos do nível d’água em PZ01.....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 53 - Monitoramentos do nível d’água em PZ02 .....</b>	<b>109</b>
<b>Figura 54 – Monitoramentos do nível d’água em PZN04.....</b>	<b>110</b>
<b>Figura 55 - Permeabilidade do pavimento experimental recém construído .....</b>	<b>113</b>
<b>Figura 56 – Lâmina d’água representando a área efetiva da simulação nº01. Área irregular e efetiva do ensaio (a), área de localização dos tanques de 1000L (b) .....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 57 – Comportamento do sistema permeável anterior a realização da simulação nº01.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 58 – Simulação hidráulica nº01.....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 59 – Recuperação do sistema permeável – Simulação nº01 .....</b>	<b>118</b>
<b>Figura 60 – Comportamento do sistema permeável anterior a realização da simulação nº02.....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 61 – Simulação hidráulica nº02.....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 62 - Lâmina d’água formada na simulação nº02.....</b>	<b>120</b>
<b>Figura 63 - Recuperação do sistema permeável – Simulação nº02.....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 64 – Comportamento do sistema permeável – 24/02/2023 a 30/04/2023 .....</b>	<b>122</b>
<b>Figura 65 – Comportamento do sistema permeável – 21/03/2023 a 22/03/2023 .....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 66 – Comportamento do sistema permeável – 29/03/2023 a 30/03/2023 .....</b>	<b>124</b>
<b>Figura 67 – Comportamento do sistema permeável – 09/04/2023 .....</b>	<b>125</b>
<b>Figura 68 – Comportamento do sistema permeável – 26/04/2023 a 27/04/2023 .....</b>	<b>125</b>
<b>Figura 69 – Execução do pavimento permeável na POLI-UPE. Distribuição da brita na camada de base (a), colocação da manta e da camada de assentamento (b), execução do revestimento (c), pavimento finalizado (d).....</b>	<b>127</b>
<b>Figura 70 – Defeitos observados no pavimento devido à execução ou manutenção. Desníveis (a), espaçamentos inadequados (b), processo de colmatação (c), ausência de varrição (d).....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 71 - Área de pavimentação permeável. Antes da execução (a) e após executado (b) .....</b>	<b>128</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Especificações para o material de base.....</b>	<b>74</b>
<b>Tabela 2 - Especificações para o material de assentamento .....</b>	<b>78</b>
<b>Tabela 3 - Amostragem mínima para os ensaios no revestimento .....</b>	<b>81</b>
<b>Tabela 4 - Especificações para o revestimento em peças de concreto permeável e uso de tráfego de pedestres .....</b>	<b>81</b>
<b>Tabela 5 - Análise granulométrica - Camada de base.....</b>	<b>100</b>
<b>Tabela 6 - Resultados dos ensaios - Material da base do pavimento permeável .....</b>	<b>101</b>
<b>Tabela 7 – Análise granulométrica – Camada de assentamento.....</b>	<b>102</b>
<b>Tabela 8 - Resultados dos ensaios - Material da camada de assentamento do pavimento permeável .....</b>	<b>103</b>
<b>Tabela 9 – Ensaios nos blocos de revestimento – Avaliação dimensional e resistência à compressão .....</b>	<b>104</b>
<b>Tabela 10 – Coeficiente de permeabilidade determinados por ensaio.....</b>	<b>112</b>
<b>Tabela 11 – Total diário de chuvas em milímetros (mm) – Posto pluviométrico em santo amaro .....</b>	<b>123</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 - Efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas .....</b>	<b>24</b>
<b>Quadro 2 - Fases do desenvolvimento das águas urbanas .....</b>	<b>30</b>
<b>Quadro 3 - Sistemas sustentáveis de drenagem urbana.....</b>	<b>31</b>
<b>Quadro 4 - Estudos em escala real utilizando pavimento permeável .....</b>	<b>40</b>
<b>Quadro 5 – Referência para os ensaios do subleito de acordo com as normas: ABNT NBR 16416 (2015); ACI 522 R (2010); ACI 330 R (2008); ACI 522.1 (2013) e NRMCA (2011) .....</b>	<b>40</b>
<b>Quadro 6 – Sistema de infiltração do pavimento em função das condições locais .....</b>	<b>48</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BGI	<i>Blue-Green Infrastructure</i>
BMP	<i>Best Management Practices</i>
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CODECIPE	Coordenadoria de Defesa Civil do Estado de Pernambuco
DEP	<i>Department of Environmental Protection</i>
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LID	<i>Low Impact Development</i>
LIUDD	<i>Low Impact Urban Design and Development</i>
NRMCA	<i>National Ready Mixed Concrete Association</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
POLI	Escola Politécnica de Pernambuco
PVC	Policloreto de Vinila
SC	<i>Sponge City</i>
SUDS	<i>Sustainable Drainage Systems</i>
TML	Tráfego Muito Leve
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UPE	Universidade de Pernambuco
WSUD	<i>Water Sensitive Urban Design</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1.1 Contextualização .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>22</b>
1.3.1 Objetivo Geral .....	22
1.3.2 Objetivos Específicos .....	22
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Drenagem urbana – Abordagens e Cenários .....</b>	<b>23</b>
2.1.1 Efeitos da urbanização e os impactos no ciclo hidrológico.....	23
2.1.2 Sistemas de drenagem urbana .....	27
2.1.3 Técnicas compensatórias utilizadas na drenagem urbana .....	33
2.1.4 Dispositivos de infiltração.....	35
<b>2.2 Pavimento permeável.....</b>	<b>37</b>
2.2.1 Definição e principais aspectos .....	37
2.2.2 Pavimentos permeáveis no Brasil e no mundo.....	39
2.2.3 Tipos de sistemas de infiltração .....	45
2.2.4 Vantagens e desvantagens .....	49
2.2.5 Materiais utilizados nos revestimentos.....	51
2.2.6 Considerações sobre projeto, execução, manutenção e conservação .....	54
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>59</b>
<b>3.1 Localização e características da área de estudo .....</b>	<b>59</b>
<b>3.2 Descrição do módulo experimental.....</b>	<b>62</b>
<b>3.3 Caracterização do solo da área experimental.....</b>	<b>64</b>
3.3.1 Estudo geotécnico.....	64
3.3.2 Nível do lençol freático local .....	65
3.3.3 Análise granulométrica.....	66
3.3.4 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC) .....	68
3.3.5 Ensaio do coeficiente de permeabilidade do subleito .....	71
3.3.6 Teste de permeabilidade do solo .....	72
<b>3.4 Caracterização e requisitos dos materiais que compõem as camadas do pavimento .....</b>	<b>73</b>
3.4.1 Base .....	74



3.4.2	Manta geotêxtil.....	77
3.4.3	Camada de assentamento.....	78
3.4.4	Caracterização do revestimento.....	79
<b>3.5</b>	<b>Dimensionamento do pavimento permeável.....</b>	<b>82</b>
3.5.1	Chuva de projeto .....	82
3.5.2	Dimensionamento hidráulico .....	83
3.5.3	Análise do tráfego e dimensionamento mecânico.....	84
3.5.4	Dimensionamento final .....	86
<b>3.6</b>	<b>Monitoramento dos níveis de água na área e no pavimento permeável.....</b>	<b>86</b>
<b>3.7</b>	<b>Análise do desempenho hidráulico .....</b>	<b>90</b>
3.7.1	Ensaio de permeabilidade do pavimento .....	90
3.7.2	Realização de simulações hidráulicas em campo.....	91
3.7.3	Avaliações dos dados de precipitação e nível d'água .....	93
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>94</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do solo da área experimental.....</b>	<b>94</b>
4.1.1	Granulometria do solo .....	94
4.1.2	Ensaio de compactação .....	95
4.1.3	Índice de Suporte Califórnia (ISC).....	96
4.1.4	Coefficiente de permeabilidade do subleito .....	97
4.1.5	Teste de infiltração com anel simples .....	98
<b>4.2</b>	<b>Caracterização e análise dos materiais componentes do pavimento .....</b>	<b>99</b>
4.2.1	Camada de base.....	99
4.2.2	Camada de assentamento.....	101
4.2.3	Revestimento permeável .....	103
<b>4.3</b>	<b>Dimensionamento do pavimento permeável.....</b>	<b>105</b>
<b>4.4</b>	<b>Monitoramento dos níveis d'água.....</b>	<b>107</b>
<b>4.5</b>	<b>Análise do desempenho hidráulico .....</b>	<b>111</b>
4.5.1	Ensaio de permeabilidade do pavimento .....	111
4.5.2	Simulações hidráulicas de lâminas superficiais de chuva em campo .....	113
4.5.3	Análises dos dados de precipitação e nível d'água .....	121
<b>4.6</b>	<b>Considerações sobre a execução e manutenção do pavimento permeável.....</b>	<b>126</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>129</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>132</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

O mundo nas últimas décadas tem observado um acentuado crescimento urbano e conforme o relatório da ONU, em 2018 a população urbana já representava 55,3% da população mundial (4,220 bilhões em área urbana e 7,633 bilhões no total) (ONU, 2019). No recorte nacional, segundo o último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2010, os índices de população urbana foram ainda maiores que o cenário global, representando 84,4% da população brasileira (IBGE, 2010). Considerando as projeções mundial e nacional, estes valores apontam índices maiores ainda para o ano de 2023.

A rápida urbanização está mudando a organização populacional mundial, apresentando riscos significativos às condições de vida, ao meio ambiente e ao desenvolvimento. O número de pessoas que vivem em cidades sem água potável e saneamento adequado tem aumentado porque as melhorias na infraestrutura não acompanharam as rápidas taxas de urbanização (Roso; Oliveira; Beuter, 2021).

O ranking de urbanização dos países apresenta as taxas atualizadas para 2022, a citar, Singapura com 100% de população urbana, passando pelos 95,7% do Uruguai, 92% do Japão, 87,6% do Brasil, 83,1% dos Estados Unidos, 71,7% da Itália, 57% da Jamaica, até os 14,5% de Liechtenstein e os 13,6% de Papua Nova Guiné (World Population Review, 2022). Com isso verifica-se que as taxas de urbanização variam ao longo do planeta, mas o processo de urbanização é mundial.

As áreas urbanas mesmo ocupando uma pequena área territorial em uma bacia hidrográfica, haja vista as dimensões de área de uma bacia, provocam alterações de grandes extensões e proporções, fragilizando o ecossistema hidrográfico. As mudanças geradas ocorrem principalmente devido à elevação da impermeabilização do solo, fazendo com que a precipitação seja menos retida por ele, aumentando o volume de escoamento superficial direto (Prokešová; Horáčková; Snopková, 2022). O referido estudo avaliou a resposta do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica da Eslováquia em um período superior a 200 anos. Oliveira (2017) ressalta que com a redução da infiltração e da percolação para as reservas de água subterrâneas, tem-se o aumento das vazões de pico e a diminuição do tempo de ocorrência deles, causando maiores alagamentos e inundações urbanas.

Do ponto de vista histórico, a expansão territorial urbana é desordenada e quando se trata de áreas periféricas o problema é ainda mais grave, pois estas surgem nas zonas das cidades que são totalmente desprovidas dos serviços urbanos básicos e essenciais e geralmente sem nenhum planejamento para melhorias, pois o planejamento urbano é voltado para a cidade formal, que é ocupada pela parcela da população com renda de média a alta (Medeiros, 2017). Ou seja, os municípios têm a incapacidade de planejar uma urbanização antecipada com espaços seguros baseados na previsão da expansão urbana, de forma que a parcela da população de baixa renda busque moradia em áreas precárias, calhas secundárias ou até mesmo primárias dos rios, ou ocupem áreas públicas de alto risco aos deslizamentos e inundações urbanas (Barros, 2021).

Destaca-se, no que se refere à drenagem urbana, que o impacto da urbanização nas enchentes urbanas é transferido para jusante, de forma que, quem produz o impacto geralmente não é o mesmo que sofre as consequências dele (Acioli, 2005). Caso houvesse uma relação direta entre produzir e sofrer o impacto, provavelmente existiriam maiores probabilidades de minimização dele, por parte do gerador. Como não é desta forma, é função dos gestores públicos elaborarem e implementarem instrumentos, como por exemplo, o Plano Diretor de Drenagem Urbana, que objetivem um ordenamento mais equilibrado.

Avaliando a drenagem urbana, as suas soluções clássicas adotadas para o gerenciamento são limitadas, pois baseiam-se no conceito sanitário e higienista, onde a necessidade é apenas drenar e afastar a água. Diferentemente delas, as soluções alternativas têm conceitos sustentáveis e visam um equilíbrio entre reter a água e drená-la (Schreiber, 2022). No que diz respeito às soluções clássicas, à medida que o centro urbano se desenvolve, faz-se necessário um remodelamento do sistema de drenagem para adaptá-lo a uma nova situação com hidrogramas de cheias mais rápidos e mais críticos, tornando essas medidas não satisfatórias e não sustentáveis, ressaltados os prejuízos e as dificuldades de seguir com essas soluções clássicas (Souza; Goldefum, 1999).

Dentro desse contexto estão inseridas as soluções para a drenagem urbana que buscam resgatar as características próximas daquelas existentes durante a pré-urbanização nas bacias. Essas soluções passaram a ser conhecidas como medidas compensatórias, BMP (*Best Management Practices*) ou LID (*Low Impact Development*) (Gao *et al.*, 2013). Ressaltam-se principalmente aquelas relacionadas à capacidade de infiltração que é o ponto mais prejudicado com o avanço da impermeabilização urbana. As soluções que utilizam estruturas de infiltração contribuem

diretamente para a diminuição do volume escoado, reduzindo a probabilidade de alagamentos, e são denominadas de técnicas compensatórias de infiltração (Silva, 2019).

Conforme Tang *et al.* (2018), mecanismos mais completos como os Sistemas de Drenagem Sustentáveis (*Sustainable Drainage Systems - SUDS*), a Infraestrutura Azul-Verde (*Blue-Green Infrastructure - BGI*) e o Projeto Urbano Sensível à Água (*Water Sensitive Urban Design – WSUD*) são reconhecidos por integrar o ciclo da água com o desenvolvimento urbano de uma forma sustentável, contribuindo significativamente para ajudar no enfrentamento dos desafios contínuos das mudanças climáticas e do rápido crescimento urbano que causam diversos problemas como as inundações urbanas.

## 1.2 Justificativa

Os mecanismos de drenagem sustentável são uma composição de sistemas, dentre eles os sistemas compensatórios de infiltração, que são compostos por dispositivos que facilitam a retenção e o amortecimento do escoamento superficial direto (*runoff*) possibilitando, através de infiltração e percolação, o escoamento das águas pluviais para o subsolo, desempenhando funções de controle dos fluxos de água na superfície e de poluentes provenientes das bacias de drenagem (Coutinho, 2011).

Fletcher *et al.* (2015) descrevem que o termo compensatório faz referência ao propósito central destas técnicas que visam compensar ou reduzir os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico, sendo este termo particularmente utilizado em Bordeaux na França desde a década de 80 e em outros países, como o Brasil.

Dentre os dispositivos compensatórios de infiltração, encontram-se diversos sistemas como os jardins de chuva, as valas e valetas de infiltração e os pavimentos permeáveis. Todos promovem um controle de água na fonte, ou seja, a água pluvial é retida no local onde precipitou (Bezerra *et al.*, 2022). Estes dispositivos visam reduzir o desequilíbrio no ciclo natural de infiltração, percolação e escoamento da água causado pela urbanização e pelas elevadas taxas de impermeabilização.

Os pavimentos permeáveis podem ser definidos, de forma sucinta, como estruturas que possuem, em sua composição de camadas, vazios que permitem a passagem de ar e água (Debnath; Sarkar, 2020). Sua camada de revestimento deve ser construída com o intuito de

permitir a passagem rápida da água por infiltração que ficará armazenada por um determinado período nas camadas de base e sub-base. Estas camadas do pavimento funcionam como reservatório e filtro até que a água percole para o solo do subleito diretamente, ou então seja retirada dessas camadas através de drenos (Silva, 2019).

Na maioria das vezes, os pavimentos permeáveis contribuem mais do que áreas urbanas totalmente livres de pavimentação no combate ao problema de impermeabilização do solo, causado pela urbanização. Este fato acontece principalmente porque as áreas livres de pavimentos possuem camadas de solo altamente compactadas, e mesmo que tenham na sua superfície cobertura vegetal, também possuem camadas inferiores compactadas, o que dificulta o processo de infiltração da água. Nos pavimentos permeáveis esse nível de compactação das camadas é reduzido, permitindo o acúmulo de água nos vazios das camadas (Marchioni; Silva, 2011).

Existem diversos estudos sobre as alternativas compensatórias de drenagem urbana, dentre eles o de Nascimento e Baptista (2009) que destacam a vantagem da integração de soluções compensatórias implantadas de forma associada às estruturas urbanas, como os pavimentos permeáveis no sistema viário ou em áreas de estacionamento. Silva (2019) apresenta os pavimentos permeáveis e os telhados verdes como alternativas que contribuem efetivamente para a redução do volume escoado e filtragem da carga poluidora. Shang *et al.* (2022) descrevem que a combinação das técnicas de baixo impacto estudadas por eles, células de biorretenção, pavimentos permeáveis e telhados verdes obtêm melhor desempenho de controle de escoamento com menos área de construção para o local densamente povoado em Wuhan na China.

Justifica-se então, a análise da alternativa compensatória de drenagem utilizando pavimentos permeáveis como uma solução viável que compõe os Sistemas de Drenagem Sustentáveis (SUDS) e tem impacto na redução dos danos causados pela urbanização e consequente impermeabilização do solo, buscando aumentar a capacidade de infiltração e retenção da águas pluviais e reduzir o escoamento superficial direto, amortizando as inundações urbanas.

A avaliação do pavimento permeável enquanto alternativa compensatória neste estudo, busca suprir uma das lacunas destacadas por Weiss *et al.* (2019), apresentando dados de permeabilidade do pavimento e seu revestimento recém construído para servirem de parâmetro comparativo de durabilidade ao longo do tempo. Dados de simulações hidráulicas e análises

de desempenho hidráulico também serão apresentados, incorporando ao estudo, tanto as análises mecânicas, quanto as hidráulicas do pavimento em escala real de uma obra executada na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI-UPE).

### 1.3 Objetivos

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade da utilização do pavimento permeável como uma alternativa compensatória em drenagem urbana, avaliando o seu comportamento hidráulico no aumento dos volumes infiltrados com a redução do escoamento superficial direto e diminuição das vazões de pico com consequente mitigação dos alagamentos urbanos.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, destacam-se os seguintes objetivos específicos necessários:

- Apresentar o tipo de solo de suporte e sua capacidade de infiltração para analisar o comportamento hidráulico do pavimento permeável experimental;
- Analisar se o pavimento permeável executado é satisfatório para os requisitos normativos e mecânicos, com a realização dos ensaios de caracterização dos materiais que compõem as suas camadas;
- Avaliar comparativamente o pavimento executado na Escola Politécnica de Pernambuco com os respectivos dimensionamentos hidráulico e mecânico;
- Determinar a eficiência hidráulica de infiltração do pavimento recém construído, através de ensaios de permeabilidade;
- Apresentar o comportamento hidráulico do pavimento permeável e sua influência na diminuição dos volumes escoados através de ensaios de simulação hidráulica experimental e análises de precipitações reais.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico apresenta em seu desenvolvimento duas grandes temáticas, sendo a primeira delas relativa aos aspectos da drenagem urbana e a segunda, aos pavimentos permeáveis enquanto técnica compensatória.

### 2.1 Drenagem urbana – Abordagens e Cenários

#### 2.1.1 Efeitos da urbanização e os impactos no ciclo hidrológico

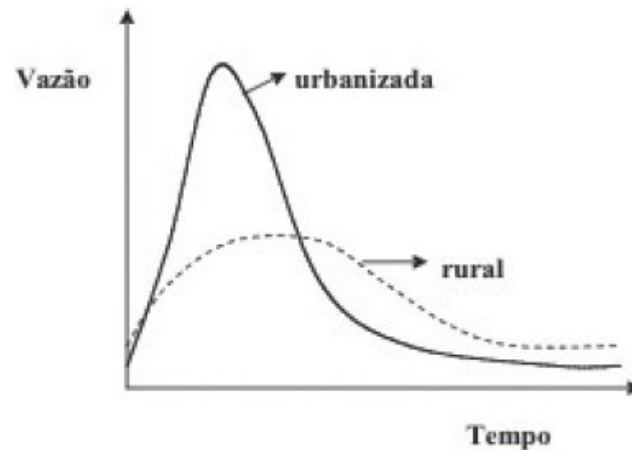
O Brasil e o mundo apresentam, ao longo das últimas décadas, um crescimento significativo da população urbana, que resulta em infraestruturas que não acompanham o crescimento da taxa de urbanização (Damasceno, 2022). Esta crescente urbanização somada ao uso desordenado do solo com intensas impermeabilizações, tem agravado os problemas de alagamentos nas grandes cidades (Tucci, 1997).

Quando aborda-se o processo de urbanização, é importante destacar quais as características negativas desse desenvolvimento urbano que resultarão em impactos na drenagem urbana. É possível identificar o aumento das áreas impermeáveis; a verticalização e densificação dos espaços, reduzindo as áreas públicas como os parques; o estrangulamento do espaço originário das águas; a não preservação das condições naturais de escoamento e infiltração, construindo condutos e canais com superfícies de concreto visando aumentar o escoamento direto; e a prevalência do uso do espaço de acordo com os interesses da ocupação, sem preocupações de conservação ambiental (Cabral, 2022).

Dentre os impactos diretos da urbanização na drenagem urbana, vale destacar: o aumento da vazão máxima e da recorrência das inundações; o aumento da carga de resíduos sólidos e poluentes transportada pela rede de drenagem, causando redução da qualidade da água à jusante; o escorregamento de encostas devido à falta de drenagem e ocupações inadequadas; e as doenças de veiculação hídrica, como a leptospirose (Cabral, 2022).

Para uma análise da urbanização em relação à drenagem urbana, é representativo avaliar o comportamento do hidrograma, que é um gráfico que relaciona a vazão com o tempo, de uma área rural e de uma área urbanizada. Essa comparação dos hidrogramas é apresentada na Figura 1.

**Figura 1 - Hidrogramas das áreas urbanizada e rural**



Fonte: Tucci (2008)

É possível observar que o pico de vazão na área urbana tem maior intensidade e é antecipado em relação à área rural, o que representa o impacto na magnitude e na aceleração temporal da ocorrência das inundações.

Avaliando a urbanização, conceitua-se como índice de impermeabilização a razão entre a área impermeabilizada e a área total. Esta área impermeabilizada é resultado de uma cobertura permanente de uma área de solo natural com materiais artificiais que são impermeáveis, como o asfalto ou concreto para a construção de estradas e edifícios, por exemplo (Marchioni, 2018). O índice de impermeabilização varia de 0 a 1, onde os valores mais próximos a 1, representam áreas densamente urbanizadas e impermeabilizadas.

O Quadro 1, elaborado por Coutinho (2011) através de uma adaptação de Tucci (2009), apresenta de forma clara relações de causa e efeitos da urbanização.

**Quadro 1 - Efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas**

<b>Lixo</b>	Degradação da qualidade da água Entupimento de bueiros e galerias
<b>Redes de esgotos deficientes</b>	Degradação da qualidade da água Moléstias de veiculação hídrica
<b>Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado</b>	Maiores picos e volumes Mais erosão Assoreamento em canais e galerias
<b>Ocupação das várzeas</b>	Maiores prejuízos de inundações Maiores picos Maiores custos de utilidades públicas

Fonte: Coutinho (2011), adaptado de Tucci (2009).



O Quadro 1 é elucidativo ao apresentar algumas relações causa-efeito da urbanização deixando evidenciado que esses efeitos têm impacto nas inundações urbanas e na drenagem urbana de uma forma geral, afinal o aumento da erosão, a degradação da qualidade da água e as doenças de veiculação hídrica são impactos que vão além dos efeitos negativos que aumentam as proporções e consequências das inundações, como maiores picos e volumes de cheias e entupimento de bueiros e galerias.

Avaliando com mais detalhe o processo de urbanização e ocupação territorial, e sabendo que a maioria das cidades urbanas brasileiras se desenvolvem sem o devido planejamento integrado das várias infraestruturas necessárias ao desenvolvimento harmônico da cidade, surgem os problemas de drenagem devido aos eventos hidrológicos de alta intensidade. Inicialmente, as áreas mais afetadas se localizavam próximas aos cursos de água, em locais de ocupação da calha secundária das áreas ribeirinhas. Com a rápida e desordenada expansão territorial urbana e com o uso e ocupação do solo inadequado, os problemas de alagamentos e inundações se intensificaram e se distribuíram ao longo das linhas naturais de escoamento superficial direto, em função da planialtimetria da cidade e do grau de impermeabilização da área de drenagem (Coutinho, 2011).

A ABCP (2021) apresenta uma análise sobre alguns aspectos problemáticos da drenagem urbana (Figura 2), abordando o excesso de escoamento superficial (*runoff*), inundações da rede de drenagem e dos rios, além da erosão e da poluição difusa.

**Figura 2 - Alguns aspectos problemáticos relativos à drenagem urbana**



Fonte: ABCP (2021)

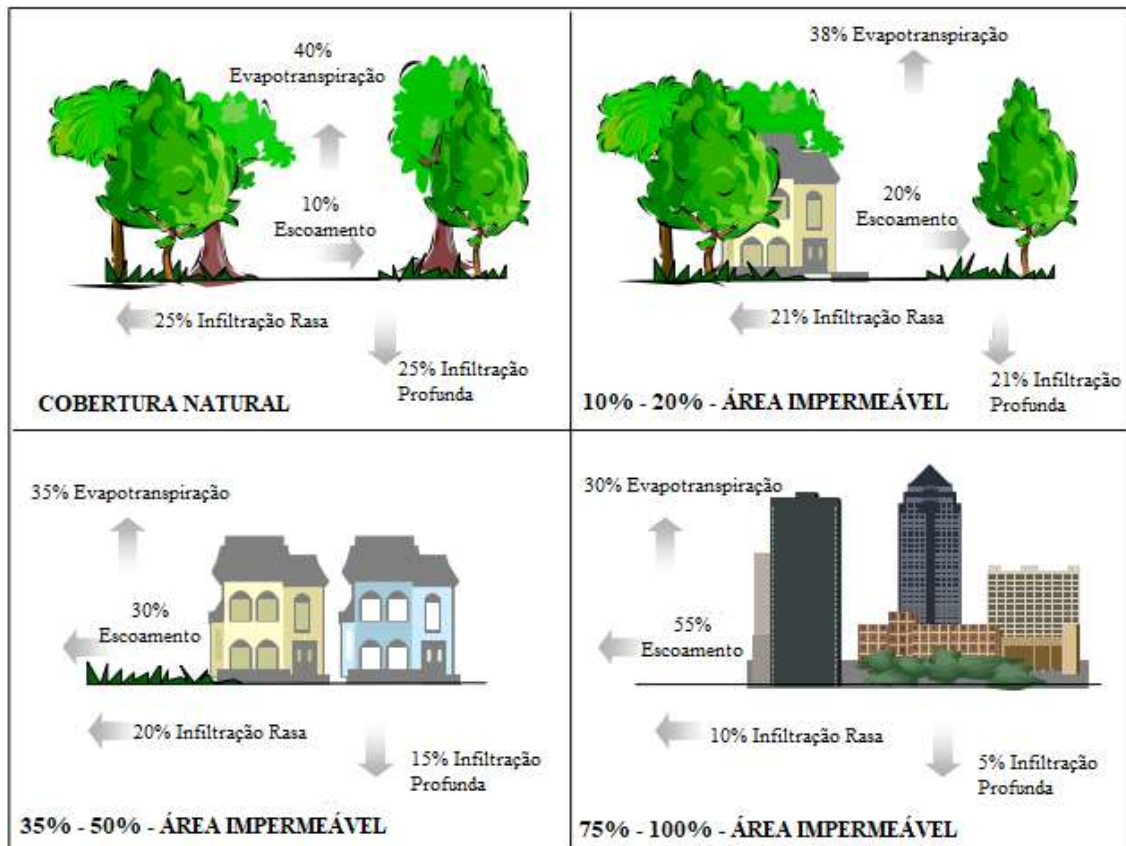
Analisando o ciclo hidrológico, sabe-se que ele inclui diversos processos que ocorrem continuamente. A água quando evapora dos oceanos e da superfície terrestre tem o seu vapor transportado e elevado para a atmosfera até se condensar e precipitar na terra ou nos oceanos. Essa água precipitada em terra pode ser interceptada pela vegetação; tornar-se escoamento superficial direto sobre o solo; ou infiltrar-se no solo como infiltração rasa e escoamento subsuperficial ou como infiltração profunda, após percolação, para recarregar as águas subterrâneas (Marchioni, 2018).

Muito da água interceptada pela vegetação ou como escoamento subsuperficial retorna à atmosfera por evaporação ou naturalmente flui para o mar, e as águas subterrâneas também retornam emergindo posteriormente em nascentes ou em córregos para formar escoamento superficial, e finalmente fluir para o mar ou evaporar para a atmosfera no ciclo hidrológico contínuo. Este ciclo é modificado devido à urbanização resultando nas reduções da infiltração do solo, da recarga do lençol freático e da evapotranspiração, tornando a maior parte do volume de água em escoamento superficial direto que vai para a rede de esgoto aumentando o risco de enchentes (Marchioni, 2018).

A Figura 3 ilustra em quatro cenários diferentes, de acordo com os níveis de urbanização da área, os efeitos sobre o ciclo hidrológico, do aumento da área impermeabilizada. Os cenários avaliativos indicados são: cobertura natural, 10% - 20% de área impermeável, 35% - 50% de área impermeável e 75% - 100% de área impermeável (EPA, 2005). É possível identificar que são inter-relacionados quatro parâmetros: evapotranspiração, escoamento, infiltração rasa e infiltração profunda. Nos quatro cenários apresentados observa-se que o aumento da área impermeabilizada, a cada cenário, resulta em elevação do escoamento superficial direto e diminuição dos outros três parâmetros.

É possível identificar que com o aumento gradativo da impermeabilização da área, há uma diminuição progressiva da taxa de infiltração rasa e também profunda, que acarreta na redução da recarga das camadas de água subterrânea. Verifica-se ainda uma diminuição da evapotranspiração devido à relação direta que o aumento das superfícies impermeáveis acarreta em diminuição da cobertura vegetal e da água existente no solo. Por fim, observa-se o aumento do escoamento superficial direto que é responsável pela antecipação e aumento do pico do hidrograma, contribuindo para maiores inundações urbanas.

Figura 3 - Cenários avaliativos do aumento da urbanização e os efeitos sobre o ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado da Environmental Protection Agency (EPA, 2005).

### 2.1.2 Sistemas de drenagem urbana

Na abordagem dos sistemas de drenagem é importante destacar uma conceituação histórica da sociedade que está diretamente relacionada com as fases dos sistemas de drenagem urbana. A relação entre as civilizações e os cursos d'água sempre foi caracterizada por uma forte conexão, visto que a água é recurso indispensável para a vida, higiene e desenvolvimento humano, por isso as civilizações se instalaram e se desenvolveram próximos aos cursos d'água. A disponibilidade de água em abundância constituía-se como fundamental para agricultura, comércio, navegação e desenvolvimento (Christofidis; Assumpção; Kligerman, 2019).

A cidade da antiguidade conhecida como Babilônia foi o berço de uma das primeiras grandes civilizações da história e se desenvolveu entre dois grandes rios, o Tigre e o Eufrates, fazendo parte da região denominada crescente fértil. A civilização Egípcia também desenvolveu-se às margens do maior rio do continente africano, o Nilo. Esta civilização adquiriu destaque, pois o rio Nilo tinha um regime de inundações que traziam nutrientes para o solo e ajudava na agricultura, mas também causava devastação e mortes nas inundações de maior intensidade. Ou

seja, a relação com o rio possuía a ambiguidade de ser a principal ferramenta de desenvolvimento da região e em contrapartida causar grandes destruições (Cotrim, 2016).

Ainda conforme Cotrim (2016), a proximidade com os cursos d'água acarretava frequentemente enchentes e inundações naturais que afligiam e preocupavam as populações ribeirinhas. Entretanto, o risco dessas ocorrências era bem aceito pela disponibilidade abundante da água e fez com que os egípcios construíssem diques e barragens para protegerem vilas e casas das inundações mais violentas.

Tucci (2008, p. 100) afirma que:

“Até o século XX o desafio das cidades era evitar a proliferação de doenças, especialmente pelas condições sanitárias dos efluentes da própria população que contaminava suas fontes de abastecimento, criando condições ideais de proliferação de doenças infecciosas. O abastecimento de água de fontes seguras e a coleta de esgoto, com despejo a jusante (sem tratamento) do manancial da cidade, tiveram como finalidade evitar doenças e seus efeitos, mas acabaram transferindo os impactos para jusante. Essa fase é chamada de higienista”

Os preceitos higienistas para drenagem urbana buscam a rápida evacuação de águas pluviais e servidas das áreas urbanas, geralmente pelo conjunto de condutos livre (funcionamento por gravidade) que estejam preferencialmente subterrâneos, denominados galerias. Estas, em conjunto com sarjetas e bocas de lobo, formam a rede de microdrenagem e drenam a água até os canais e cursos d'água que compõem a macrodrenagem (Virgillis, 2009).

O objetivo principal do conceito higienista é a canalização e o controle dos cursos d'água urbanos, e como consequência, a redução da ocorrência de doenças de veiculação hídrica, mas isso promoveu uma alteração na relação harmônica entre os aglomerados urbanos e os cursos d'água. O conceito higienista promoveu uma mudança radical de eliminação rápida das águas pluviais e servidas para o mais distante possível das cidades, alterando o papel dos cursos d'água no cenário urbanístico da cidade como um, até então, elemento da paisagem e fator de embelezamento das cidades. No entanto, como as águas servidas eram despejadas nas vias públicas e ficavam confinadas nos centros urbanos, bem como as águas pluviais (Figura 4), anteriormente ao conceito higienista, resultava em ambientes insalubres com o desenvolvimento de doenças e epidemias sanitárias, que precisavam ser sanados (Baptista; Nascimento; Barraud, 2011).

**Figura 4 - Cidade de São Paulo nas primeiras décadas do século XX**



Fonte: Adaptado de Vasconcellos e Rodrigues (2006)

Virgillis (2009) afirma que, a partir de 1970, outra abordagem para a drenagem urbana foi desenvolvida na Europa e América do Norte. Em relação à qualidade de água, foram realizados investimentos em tratamento de esgoto comercial e industrial, recuperando parte da qualidade dos sistemas hídricos, implementando os processos de tratamento de efluentes. Conseqüentemente, houve melhoria das condições ambientais e redução da deterioração das fontes de abastecimento.

Em relação aos problemas das enchentes, nesta mesma época, verificou-se que era insustentável continuar a construção de obras de drenagem que, em razão da urbanização, apenas aumentassem o escoamento, por exemplo a canalização de rios naturais. Então, foram revisados os procedimentos visando utilizar sistemas de amortecimento (tecnologias alternativas ou compensatórias) ao invés das canalizações clássicas. Esses sistemas buscam minimizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos, com benefícios para a qualidade de vida e preservação ambiental, compensando-os de algumas formas, como por exemplo, o controle do excesso de escoamento superficial e aumento da infiltração de água no solo. Essas novas abordagens de 1970 compõem a denominada fase corretiva das águas urbanas (Tucci, 2008).

No entanto, desde 1990 observou-se com mais atenção a persistência de parte da poluição por fontes difusas, devido as inundações urbanas. Alguns países passaram a investir em políticas de desenvolvimento urbano sustentável, baseando-se em tratamento das águas pluviais, conservação do escoamento pluvial e tratamento dos efluentes em nível terciário para retirada de nitrogênio e fósforo que eutrofizam os lagos. Almejou-se também, a preservação dos caminhos naturais das águas e do escoamento e a priorização da infiltração. Essa fase é denominada de desenvolvimento sustentável.

O Quadro 2 apresenta de forma esquemática as quatro fases, descritas por Tucci (2008), com o resumo de suas características e consequências.

**Quadro 2 - Fases do desenvolvimento das águas urbanas**

<b>Fase</b>	<b>Características</b>	<b>Consequências</b>
Pré-higienista: até início do século XX	Esgoto em fossas ou na drenagem, sem coleta ou tratamento e água da fonte mais próxima, poço ou rio.	Doenças e epidemias, grande mortalidade e inundações.
Higienista: antes de 1970	Transporte de esgoto distante das pessoas e canalização do escoamento.	Redução das doenças, mas rios contaminados, impactos nas fontes de água e inundações.
Corretiva: entre 1970 e 1990	Tratamento de esgoto doméstico e industrial, amortecimento do escoamento.	Recuperação dos rios, restando poluição difusa, obras hidráulicas e impacto ambiental.
Desenvolvimento sustentável: depois de 1990	Tratamento terciário e do escoamento pluvial, novos desenvolvimentos que preservam o sistema natural.	Conservação ambiental, redução das inundações e melhoria da qualidade de vida.

Fonte: Tucci (2008)

Poleto (2011) afirma que os países em desenvolvimento encontram-se atrasados temporalmente em relação à fase do desenvolvimento das águas urbanas, pois o controle quantitativo da drenagem urbana ainda é limitado e o de controle da qualidade da água, resultante da drenagem, ainda está longe de ser atingido. O Brasil, conforme Tucci (2008), ainda está na fase higienista em razão da falta de tratamento de esgoto, da transferência de inundação para jusante na drenagem e pela falta de controle dos resíduos sólidos, como pode ser visto na Figura 5. Em contrapartida, alguns estudos seguem buscando evoluções para o cenário brasileiro de desenvolvimento das águas urbanas.

**Figura 5 - Brasil Higienista, cidade de Recife (PE) em 2021**



Fonte: Jornal do comércio (2021)

A ABCP (2021) sintetiza uma pequena linha temporal com as palavras chaves incorporadas nas fases do desenvolvimento das águas urbanas (Figura 6).

**Figura 6 - Síntese temporal das fases do desenvolvimento das águas urbanas**



Fonte: ABCP (2021)

Por sua vez, apresenta-se no Quadro 3 um resumo com o conceito e a aplicação de sistemas sustentáveis com os locais onde surgiram os respectivos sistemas, um resumo do objetivo deles e alguns exemplos de aplicação. Destaca-se que esses sistemas se aplicam em outras localidades além do local do surgimento, e também que o Quadro 3 abrange locais dos continentes americano, europeu, asiático e da oceania, demonstrando o interesse e a relevância global na temática. O Brasil consta no Quadro 3 para apresentar o panorama nacional que é importante para o entendimento das condições locais.

**Quadro 3 - Sistemas sustentáveis de drenagem urbana**

Local	Sistemas	Resumo e Objetivos	Exemplo de Aplicação
<b>Estados Unidos e Canadá</b>	Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto ( <i>Low Impact Development-LID</i> )	Aproximar a drenagem urbana do sistema natural, incentivando práticas de reuso e infiltração. Emprego de práticas de controle por lote ou loteamento, principalmente detenções e retenções.	Portland - Através da implantação de telhados verdes, valas de infiltração, faixas gramadas, pavimentos permeáveis e reeducação da população; conseguiu em 1996 uma redução de 35% do escoamento superficial nas ruas da cidade.

**Quadro 3 - Sistemas sustentáveis de drenagem urbana (cont.)**

Local	Sistemas	Resumo e Objetivos	Exemplo de Aplicação
<b>Reino Unido</b>	Sistemas Sustentáveis de Drenagem Urbana ( <i>Sustainable Urban Drainage Systems –SUDS</i> )	Amenizar os efeitos da urbanização através da diminuição do escoamento superficial e aumento da infiltração, criando áreas permeáveis e de retenção da água pluvial como parte de um conjunto maior, que é o gerenciamento dos recursos hídricos. Para isso, utilizam-se dispositivos que podem ser empregados em conjunto ou separadamente, em função do projeto, das necessidades ou ainda das possibilidades locais, proporcionando uma boa relação custo-benefício, além dos ganhos sociais e ambientais.	<p>Inglaterra - País mais desenvolvido em estudos, desenvolvimento e aplicações do <i>SUDS</i>, onde universidades e empresas trabalham em conjunto para o melhor desenvolvimento de técnicas sustentáveis.</p> <p>Escócia - O uso do <i>SUDS</i> tornou-se uma prática comum, com mais de 700 locais referenciados e aproximadamente 4.000 sistemas sendo implantados.</p> <p>Alguns dispositivos utilizados: pavimento permeável, reservatórios de retenção e retenção, trincheira de infiltração, vala de infiltração, poço de infiltração, microrreservatório, telhado verde, bacia subterrânea e faixas gramadas.</p>
<b>Austrália</b>	Projeto Urbano Hidricamente Sensível ( <i>Water Sensitive Urban Design – WSUD</i> )	Usar técnicas que aproximem o máximo possível o fluxo das águas do seu curso natural, objetivando reunir, em um mesmo conceito, uma relação ideal entre pessoas, governança, ambiente construído, infraestrutura, ecossistemas vivos e uso de recursos.	<p>Melbourne - Segue o modelo proposto <i>WSUD</i>, que propõe a mudança de paradigma em relação à gestão das águas urbanas, considerando então todos os fluxos de água como um recurso.</p> <p>Os estudos desenvolvidos na Austrália são de grande importância para o Brasil, devido as similaridades climáticas dos dois países, diminuindo o número de adaptações para que as técnicas sejam aplicadas no Brasil.</p>
<b>Nova Zelândia</b>	Projeto e Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto ( <i>Low Impact Urban Design and Development – LIUDD</i> )	Otimizar o desempenho das cidades, melhorando a integração entre as atividades humanas e os processos naturais, respeitando os ciclos da natureza para manter os recursos ecológicos.	<p>Long Bay, na cidade de Auckland - O plano de estrutura para a bacia de Long Bay adota muitos princípios <i>LIUDD</i>, dentre eles: proteção e revegetação dos corredores ribeirinhos dos córregos e terrenos na bacia superior; captação e tratamento de águas pluviais na fonte; minimização das áreas impermeáveis na bacia superior; redução do uso de água potável com o uso de caixas pluviais obrigatórias. O plano de estrutura incentiva ativamente os moradores a se envolverem na gestão do abastecimento de água, do esgoto e das águas pluviais (Van Roon, M. e Van Roon, H., 2009).</p>



**Quadro 3 - Sistemas sustentáveis de drenagem urbana (cont.)**

Local	Sistemas	Resumo e Objetivos	Exemplo de Aplicação
<b>China</b>	Cidades Esponjas ( <i>Sponge City - SC</i> ) que são uma implementação da abordagem <i>WSUD</i>	Alcançar uma regulação do ciclo da água visando o mais próximo possível do ciclo hidrológico natural, através de medidas que consigam restaurar a capacidade da cidade de absorver, infiltrar, armazenar, purificar, drenar e gerenciar a água. Também objetiva buscar a capacidade de integração da gestão de risco de inundação urbana em suas políticas, projetos de planejamento urbano, mitigação dos impactos da escassez de água e capacitar as comunidades visando a convivência com as águas.	Xi'an - Foram adotadas medidas na cidade, focalizadas em inundação pluvial, poluição da água e escassez hídrica, objetivando também uma taxa de controle de chuva anual de 85% e 60% da taxa de controle do total de sólidos suspensos. As medidas técnicas implementadas foram: jardins de chuva e outras biorretenções, pavimentos permeáveis, armazenamento modular de água da chuva, telhados verdes, bacias de retenção de águas pluviais (Qiao; Liao; Randrup, 2020).
<b>Brasil</b>	A maioria das obras de drenagem existentes no Brasil ainda segue o conceito sanitário-higienista	Entre as dificuldades encontradas para implantação dos sistemas sustentáveis, encontram-se: a falta de integração urbano-paisagística e seus usos, a contaminações por esgotos, a falta de controle dos resíduos sólidos, a transferências das inundações urbanas para jusante e a falta de consciência ambiental. No Brasil, observa-se uma grande preocupação com os aspectos relacionados à quantidade da água pluvial, em detrimento da qualidade dessa água. Isso se deve, principalmente, às grandes demandas por saneamento básico, além de falta de uma política nacional de saneamento, corpo técnico qualificado, fiscalização de órgãos ambientais, redes de monitoramento, recursos financeiros, dentre outros.	Para que o <i>SUDS</i> e os demais sistemas com conceitos de desenvolvimento sustentável, sejam aplicados com bom aproveitamento no Brasil, é importante que haja uma adequação à nossa realidade. Pois, apesar da criação de Planos Diretores voltados à drenagem pluvial, questões ambientais ainda são pouco abordadas e estão longe de se enquadrar em um modelo ideal de drenagem pluvial, como propõe, por exemplo, o <i>SUDS</i> . Portanto, há muito a ser percorrido rumo a um dos paradigmas do gerenciamento de recursos hídricos, que é a sustentabilidade do sistema que envolve as bacias hidrográficas urbanas.

Fonte: Autor, baseado em informações de Poletto (2011), Oliveira (2017) e Januszkiewicz; Golebieski (2019)

### 2.1.3 Técnicas compensatórias utilizadas na drenagem urbana

Conforme apresentado no Quadro 3, para aplicação dos sistemas sustentáveis utilizados na drenagem urbana, existem diversas técnicas ou dispositivos que são utilizados objetivando atingir o que preconizam os conceitos dos sistemas sustentáveis. Essas técnicas ou dispositivos são denominados compensatórios e dentre eles estão os telhados verdes, pavimentos permeáveis, reservatórios de detenção e retenção, trincheiras de infiltração, faixas gramadas, valas de infiltração, poços de infiltração e reservatórios subterrâneos de águas pluviais.

Melo *et al.* (2013) descrevem que as técnicas compensatórias têm como objetivos minimizar os efeitos da urbanização, reduzir a geração dos volumes de escoamento superficial direto, maximizar o controle de águas pluviais na fonte, restaurar os processos envolvidos no ciclo hidrológico e potencializar a qualidade das águas e recarga dos aquíferos.

As técnicas compensatórias podem ser classificadas enquanto medidas estruturais ou não estruturais, sendo as estruturais aquelas que envolvem obras e ações físicas implementadas e as não estruturais são programas, normas, regulamentos, sistemas de monitoramento e alerta, dentre outros (Paixão; Vieira; Malutta, 2022).

Dentre as medidas não estruturais compensatórias, Melo (2011) destaca o planejamento e regulação do uso do solo; participação popular e educação ambiental; planos de recuperação de matas ciliares; planos de ação para a desconexão de áreas impermeáveis e utilização de revestimento rugoso em vias e canais; manejo de materiais e produtos químicos; e a manutenção dos dispositivos estruturais existentes.

A respeito das medidas estruturais, Melo (2011) apresenta uma divisão em técnicas de controle centralizado com as bacias de detenção, retenção e infiltração e as áreas úmidas artificiais; e em técnicas de controle na fonte, subdivididas em localizada e linear. Destacam-se como controle na fonte localizado, os telhados verdes, microrreservatórios, poços de infiltração e sistemas de biorretenção; e como controle na fonte linear têm-se as trincheiras de inalação, valas de detenção e de infiltração, pavimentos permeáveis e áreas úmidas lineares.

Outra classificação das técnicas compensatórias considera as principais finalidades de utilização da respectiva técnica, dividindo-se em retenção, infiltração e armazenamento. Destaca-se que, os objetivos principais como minorar os efeitos da urbanização e diminuir os volumes de escoamento superficial direto são comuns a todas as técnicas, ou seja, elas possuem uma finalidade básica de captar, reter, armazenar e infiltrar as águas pluviais.

As técnicas com finalidade de retenção capturam as águas pluviais através dos dispositivos, e os volumes de água, depois de retidos, podem ser direcionados aos sistemas de drenagem existentes diretamente e retornar ao ciclo hidrológico através dos processos de interceptação vegetal, evapotranspiração e infiltração, ou ainda serem direcionados para outras finalidades, como por exemplo, o reuso (Barros, 2021).

As técnicas com finalidade de infiltração permitem a movimentação da água da superfície para o interior do solo, sendo distribuída por percolação através dos poros. Com isso, o fluxo das águas pluviais são controlados reduzindo a parcela de escoamento superficial direto, bem como a infiltração contribui para a recarga dos aquíferos subterrâneos. As técnicas com o propósito de armazenamento utilizam os dispositivos para acumular as águas, sendo aplicadas geralmente em locais que possuem solos com baixa permeabilidade e, conseqüentemente, menor capacidade de infiltração (Barros, 2021).

#### 2.1.4 Dispositivos de infiltração

A infiltração é o processo de penetração da água no solo, promovendo modificações na superfície do solo, praticamente instantâneas, nas condições de pressão e no teor de umidade, quando ocorre o contato com a água. A infiltração é relacionada às características hidrodinâmicas, estruturais e de textura do solo (Baptista; Nascimento; Barraud, 2011).

Os dispositivos compensatórios de infiltração têm por objetivo facilitar a retenção da água e, conseqüentemente, reduzir o escoamento superficial direto através da infiltração da água no solo (Ferreira; Barbassa; Moruzzi, 2018). Dentre os dispositivos de infiltração, vale ressaltar os jardins de chuva e os pavimentos permeáveis, além das trincheiras, poços e bacias de infiltração, pela sua possibilidade de execução em ambientes de cidades altamente urbanizadas.

Coutinho (2011) afirma que esses dispositivos precisam ser eficientes e projetados para resistir às ações oriundas do comportamento dos habitantes das cidades e também às operações de manutenção, visando manter o desempenho hidrológico desejável e as características paisagísticas integradas ao meio ambiente urbano.

Os dispositivos de infiltração armazenam temporariamente a água de um evento chuvoso ou resultante do escoamento superficial conseqüente deste, em um reservatório composto por agregados graúdos com índices de vazios suficientes para acúmulo d'água. Após esse acúmulo, a depender das características da qualidade dessa água e, principalmente, das características hidrodinâmicas do solo de suporte onde está instalado o dispositivo, como a taxa de infiltração inicial, a condutividade hidráulica saturada e porosidade do solo, a água é evacuada para as camadas inferiores com velocidade de infiltração condicionada às características hidrodinâmicas destacadas, podendo também não evacuar essa água por infiltração, ocorrendo apenas por drenos ou ainda com a combinação de infiltração e drenos (Coutinho, 2011).

Em Nova York, nos Estados Unidos, o *Department of Environmental Protection (DEP)* implementou um programa inovador de construção de milhares de jardins de chuva pela cidade, utilizando este dispositivo compensatório de infiltração para absorver e filtrar a água da chuva fazendo a função de melhoria da qualidade das águas da cidade e ajudando a reduzir o escoamento superficial direto com conseqüente redução dos alagamentos. Em um evento chuvoso cada jardim de chuva pode coletar até 9460 litros de água (NYC DEP, 2019). A Figura 7 apresenta um jardim de chuva da cidade de Nova York.

**Figura 7 – Jardim de chuva em Nova York, EUA**



Fonte: Ciclovivo (2019).

As estruturas de infiltração podem causar, positivamente, a redução de vazões máximas e também a redução dos volumes escoados, a primeira funcionando como um reservatório de amortecimento, e a segunda, funcionando através da infiltração das águas drenadas, desempenhando um importante papel na remoção e controle de poluentes do escoamento superficial. As estruturas de infiltração podem então ser consideradas as que recuperam de forma mais ativa as condições de pré-urbanização, com relação as estruturas de detenção e retenção que apenas efetuam função de amortecimento (Acioli, 2005).

Coutinho (2011) destaca que a capacidade de operação dos dispositivos de infiltração está fortemente relacionada à capacidade de infiltração do solo natural que vai servir de suporte para

a estrutura hidráulica. A condutividade hidráulica do solo é considerada o parâmetro base mais importante para verificação da adequação do solo para receber os dispositivos compensatórios de infiltração. Se a condutividade hidráulica apresentar valores baixos, é recomendada a adoção de sistemas de armazenamento geralmente associados a drenos. Apresentando valores altos, é um indicativo de utilização de sistemas com foco na infiltração direta, com os devidos cuidados principalmente com a capacidade de remoção de poluentes e com o risco de contaminação do aquífero, uma vez que elevadas condutividades hidráulicas podem conduzir a baixas capacidades de filtração dos poluentes pelo solo.

## 2.2 Pavimento permeável

### 2.2.1 Definição e principais aspectos

Os pavimentos permeáveis são definidos como aqueles que possuem em sua estrutura espaços abertos através de juntas ou poros por onde a água e o ar podem passar. A superfície de revestimento do pavimento recebe diretamente as cargas mecânicas referentes ao tráfego e também deve permitir que a água se infiltre prontamente, podendo ser utilizado em estradas, estacionamentos, pátios, entre outros (Marchioni, 2018). Outra definição apresentada por Weiss *et al.* (2019) descreve o pavimento permeável como possuidor de uma superfície como asfalto poroso, concreto permeável ou pavimento de concreto intertravado permeável e múltiplas camadas permeáveis para armazenar a água da chuva até que se infiltre no solo subterrâneo ou seja coletada por um dreno.

No Brasil, foi publicado em 2015, uma norma da ABNT referente aos pavimentos permeáveis. Conforme a ABNT NBR 16416 (2015, p.2) intitulada: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos, o pavimento permeável é definido como:

“Pavimento que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento e cuja estrutura permite a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura.”

Ao comparar os pavimentos permeáveis aos convencionais, Almeida (2017) indica que a principal diferença entre eles é o fato de que, além de suportar mecanicamente as cargas às quais é submetido, o tipo de sistema com pavimentação permeável deve apresentar um coeficiente de permeabilidade mínimo que permita a percolação de água através de sua estrutura, aumentando a taxa de infiltração e diminuindo o escoamento superficial direto,

mitigando problemas de alagamentos urbanos. A Figura 8, apresenta uma comparação entre os sistemas de pavimentação sob condições de chuva semelhantes.

**Figura 8 – Comparação da pavimentação convencional (direita) e a pavimentação permeável com blocos de concreto (esquerda)**

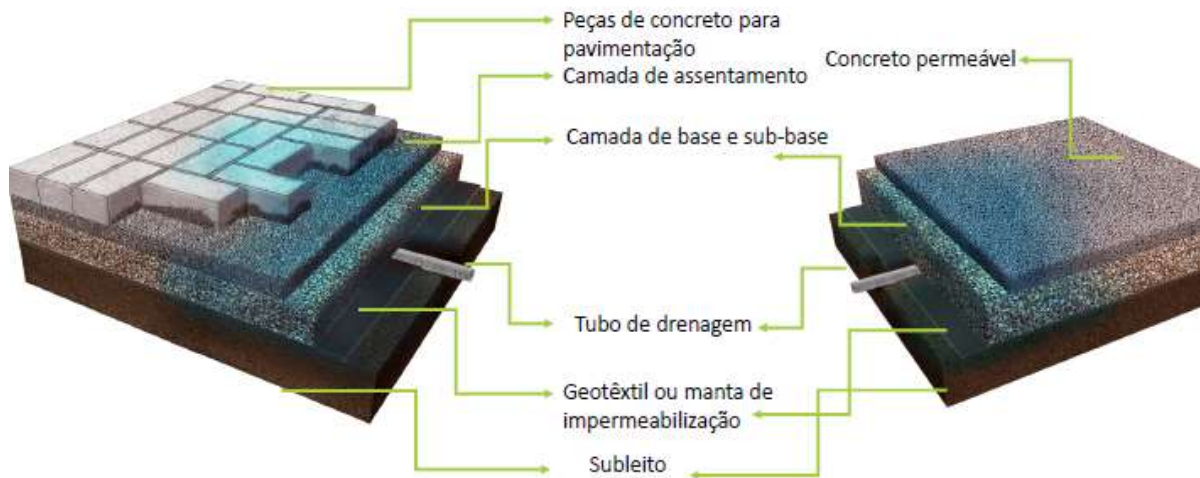


Fonte: INTERPAVE (2010)

O sistema de pavimentação permeável deve apresentar as mesmas camadas constituintes do pavimento tradicional, com a devida atenção adicional à caracterização do subleito, abaixo da estrutura, tendo em vista sua capacidade de suporte mecânico e sua condutividade hidráulica. No entanto, este tipo de pavimento precisa ser construído com materiais de características compatíveis à permeabilidade, além de uma execução peculiar, de modo que possa apresentar eficiências mecânica e hidráulica, simultaneamente (Almeida, 2017).

A ABCP (2021) apresenta, através da Figura 9, o perfil de dois tipos comuns de pavimentos permeáveis, com peças de concreto intertravados e com concreto permeável, indicando as respectivas camadas. Destaca-se a indicada como geotêxtil ou manta de impermeabilização, com o uso a depender do sistema de infiltração a ser adotado, bem como a indicação de que o tubo de drenagem pode não ser necessário, a depender do sistema. O geotêxtil é uma 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 e a manta. Esta, visa evitar a infiltração da água para o subleito, justamente para atender um tipo de sistema de infiltração.

**Figura 9 – Perfil esquemático do pavimento permeável**



Fonte: ABCP (2021)

O pavimento permeável é, então, uma técnica compensatória de infiltração que tem função de reduzir o volume de escoamento superficial direto, promovendo a atenuação dos hidrogramas de pico de enchentes, através da permissibilidade de infiltração da água em sua estrutura. Destaca-se que a sua estrutura porosa funciona como um filtro que retém parte dos sedimentos e reduz a carga de poluentes, estando o desempenho mecânico e hidráulico do pavimento permeável atrelado aos materiais de revestimento da superfície e da base e também do solo do subleito.

### 2.2.2 Pavimentos permeáveis no Brasil e no mundo

Marchioni (2018) desenvolveu um linha temporal dos estudos em escala real sobre pavimentos permeáveis, sendo na década de 80, os primeiros testes em escala real realizados, nos Estados Unidos, utilizando pavimentos de concreto permeável, na Suécia com asfalto poroso, no Japão com blocos de concreto permeável e no Reino Unido utilizando blocos de concreto com vazios. Alguns desses estudos continuaram sendo monitorados na década de 90 e outras pesquisas semelhantes foram realizadas em diversos outros locais, avaliando principalmente a eficiência dos pavimentos na redução do volume de escoamento e remoção de poluentes, comprovando a eficácia do pavimento permeável como *SUDS*. O Quadro 4 mostra os locais de desenvolvimento de algumas dessas pesquisas em escala real.

**Quadro 4 - Estudos em escala real utilizando pavimento permeável**

<b>País</b>	<b>Cidade</b>	<b>Ano</b>	<b>País</b>	<b>Cidade</b>	<b>Ano</b>
Estados Unidos	Dayton	1981	Brasil	São Paulo	2008
Reino Unido	Nottingham	1986	Reino Unido	Central Scotland	2008
Alemanha	Stadtlohn	1987	Reino Unido	New Castle	2009
Suécia	Lund	1987	Estados Unidos	New Jersey	2009
Japão	Kuki	1988	Itália	Puglia	2010
França	Rezé	1991	Espanha	Valência	2012
Alemanha	Stukenbrock	1996	Itália	Calábria	2014
Estados Unidos	Cincinnati	1996	Holanda	Utrecht	2014
Estados Unidos	Renton	1996	Brasil	Recife	2017
Reino Unido	New Castle	1999	China	Xangai	2018
Estados Unidos	North Carolina	1999	Estados Unidos	Kansas	2018
Reino Unido	Edinburg	2000	Brasil	São Paulo	2019
Bélgica	Várias	2003	Holanda	Várias	2019
Brasil	Porto Alegre	2004	Reino Unido	Bristol	2019
Canadá	Calgary	2005	Coreia do Sul	Busan	2020
Estados Unidos	Várias	2006	Croácia	Osijek	2020
Espanha	Santander	2006	China	Nanquin	2021
Nova Zelândia	Christchurch	2007	Brasil	Recife	2022

Fonte: Adaptado de Marchioni (2018) e Autor (2023)

Em relação à normatização nacional e internacional sobre os pavimentos permeáveis, Almeida (2017) apresentou uma diferenciação em relação as especificações de algumas normas para os ensaios no subleito dos pavimentos permeáveis (Quadro 5). O objetivo deste quadro é apresentar normas internacionais além da nacional e indicar que as variações normativas são comuns. No entanto, a ABNT NBR 16461 (2015) será a mais abordada na pesquisa, tendo em vista que é importante analisar os critérios da norma nacional e se eles são suficientes para que a construção de um pavimento permeável seguindo-a, entregue um resultado satisfatório.

**Quadro 5 – Referência para os ensaios do subleito de acordo com as normas: ABNT NBR 16416 (2015); ACI 522 R (2010); ACI 330 R (2008); ACI 522.1 (2013) e NRMCA (2011)**

<b>ABNT NBR 16416 (2015)</b>	<b>ACI 522 R (2010)</b>	<b>ACI 330 R (2008)</b>	<b>ACI 522.1 (2013)</b>	<b>NRMCA (2011)</b>
	<b>ASTM D422</b> (tamanho das partículas)	<b>ASTM D1196</b> (módulo de reação do subleito – k)		



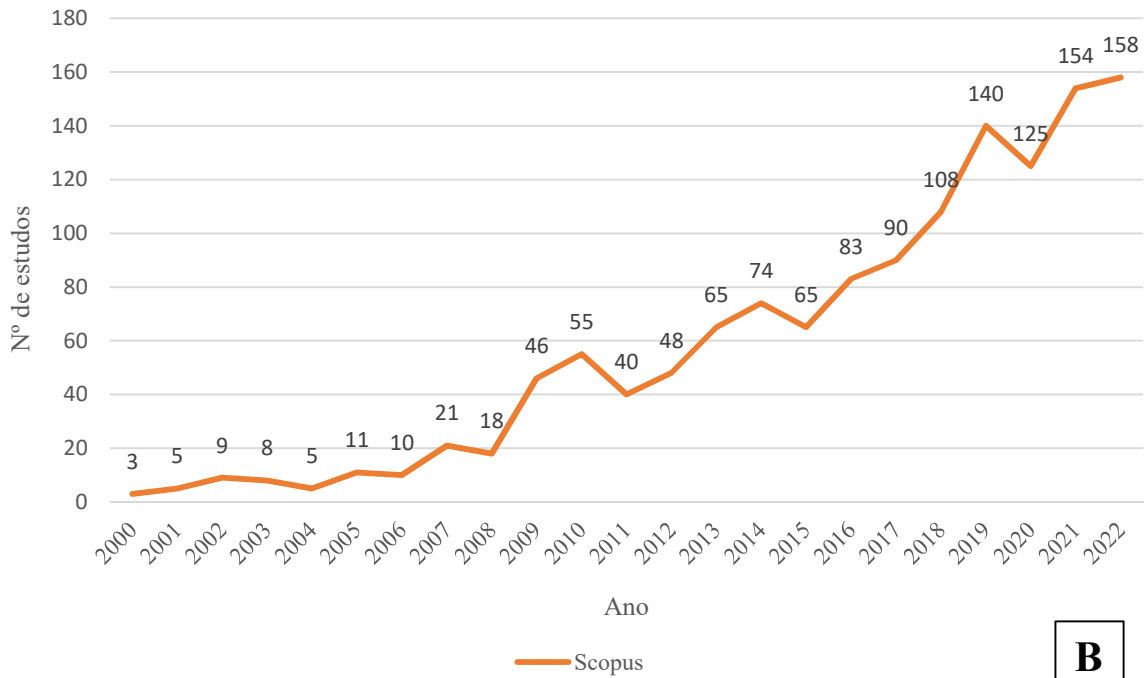
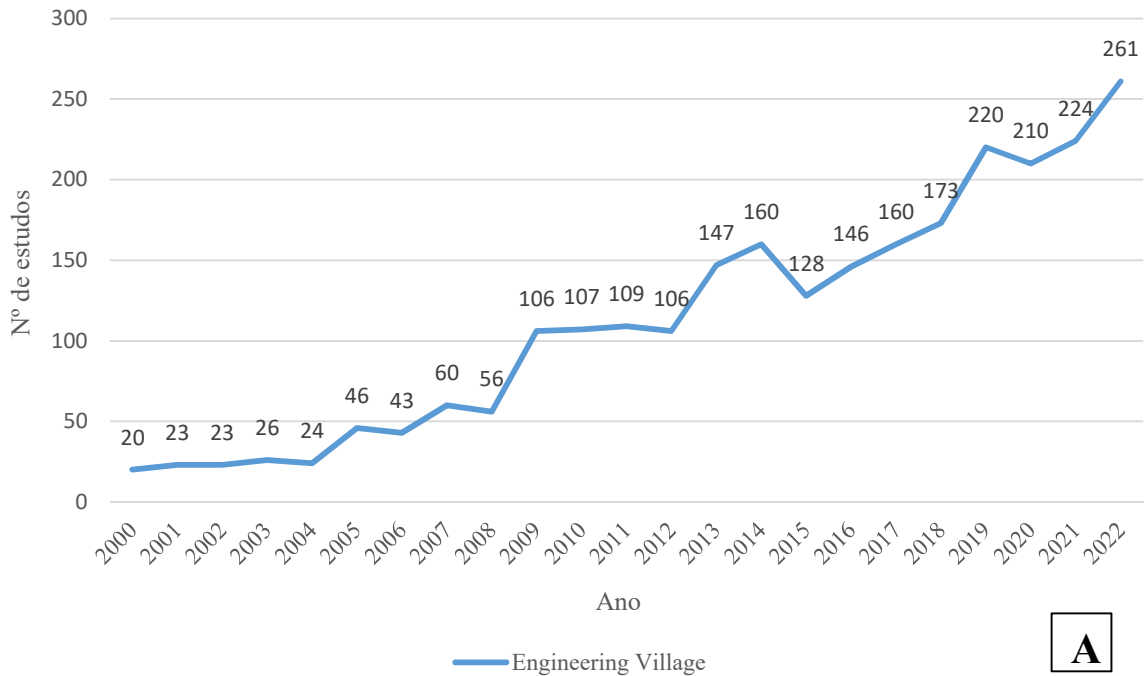
**Quadro 5 – Referência para os ensaios do subleito de acordo com as normas: ABNT NBR 16416 (2015); ACI 522 R (2010); ACI 330 R (2008); ACI 522.1 (2013) e NRMCA (2011) (cont.)**

ABNT NBR 16416 (2015)	ACI 522 R (2010)	ACI 330 R (2008)	ACI 522.1 (2013)	NRMCA (2011)
	ASTM D2487 (classificação)	ASTM D2487 (classificação)		ASTM D698 (proctor normal)
	ASTM D698 (proctor normal)	ASTM D698 (proctor normal para compactação de tráfego leve)		ASTM D1557 (proctor modificado)
	ASTM D1557 (proctor modificado)	ASTM D1557 (proctor modificado para compactação de tráfego pesado)		
NBR 13292/ NBR 14545 (permeabilidade)	ASTM D3385 (permeabilidade – double ring infiltrometer)	ASTM D2844 (valor de resistência – R)	ASTM D3385 (permeabilidade)	
	Ensaio padrão ASTM – a depender do tipo de solo (densidade/compactação)	ASTM D4318 (índice de plasticidade)		
NBR 9895 (CBR)	ASTM D1883 (CBR)	ASTM D1883/ D1429 (CBR)		

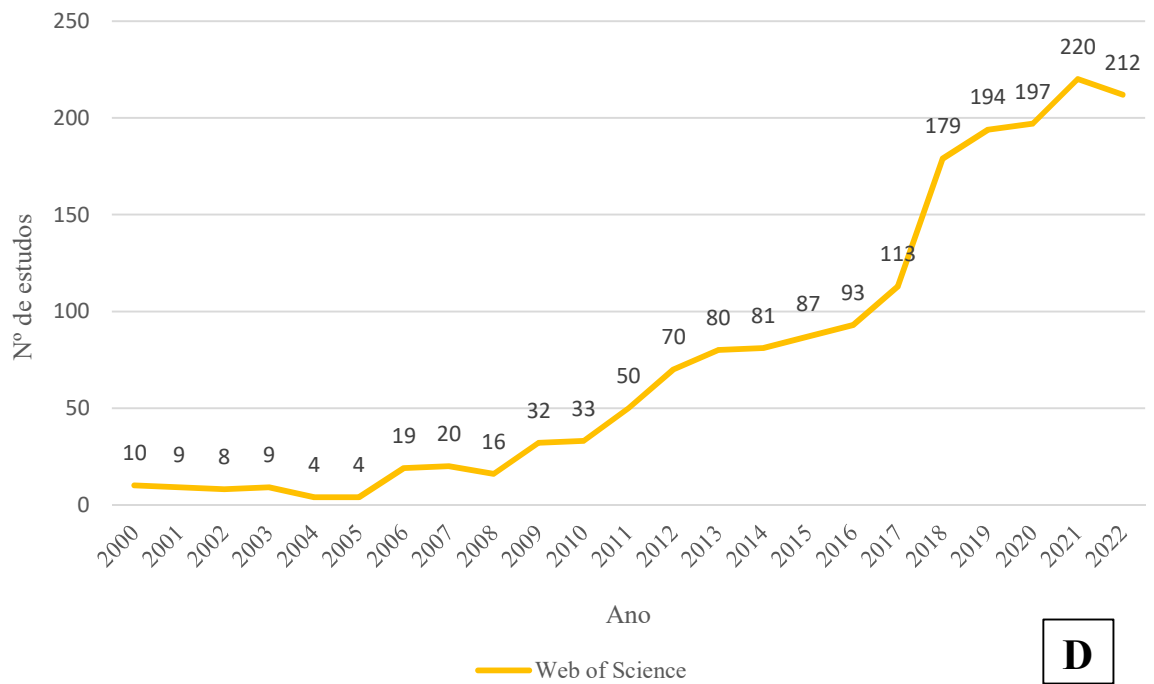
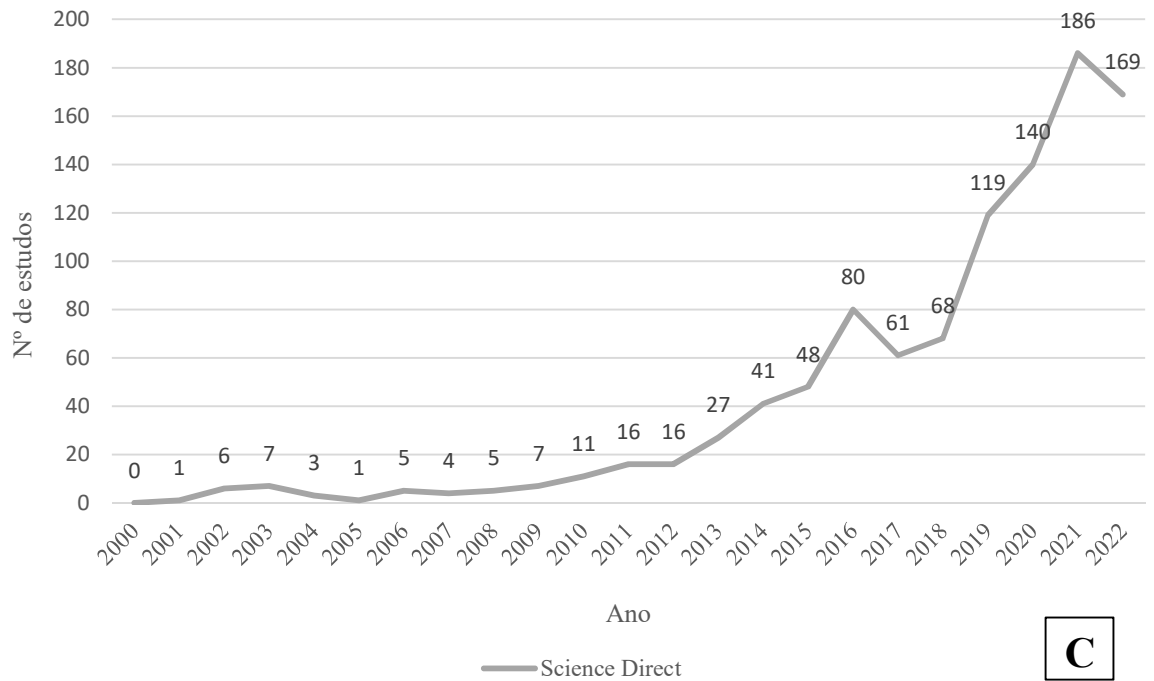
Fonte: Almeida (2017)

Com a intenção de indicar o crescimento de estudos relacionados aos pavimentos permeáveis, foram pesquisadas em 4 bases de dados (Engineering Village, Scopus, Science Direct e Web of Science) os estudos sobre pavimentos permeáveis ou pavimentos porosos que são termos indexados nas bases e para isso são buscados com a *string* de busca: *pervious pavement or permeable pavements*. Com isso, encontraram-se diversos estudos, a grande maioria em inglês, acerca da temática. A Figura 10 apresenta os resultados para as 4 bases de dados, podendo ser observado a tendência de elevado crescimento dos estudos relacionados aos pavimentos permeáveis no mundo.

**Figura 10 – Número de estudos por bases de dados. Engineering Village (A); Scopus (B); Science Direct (C); Web of Science (D)**



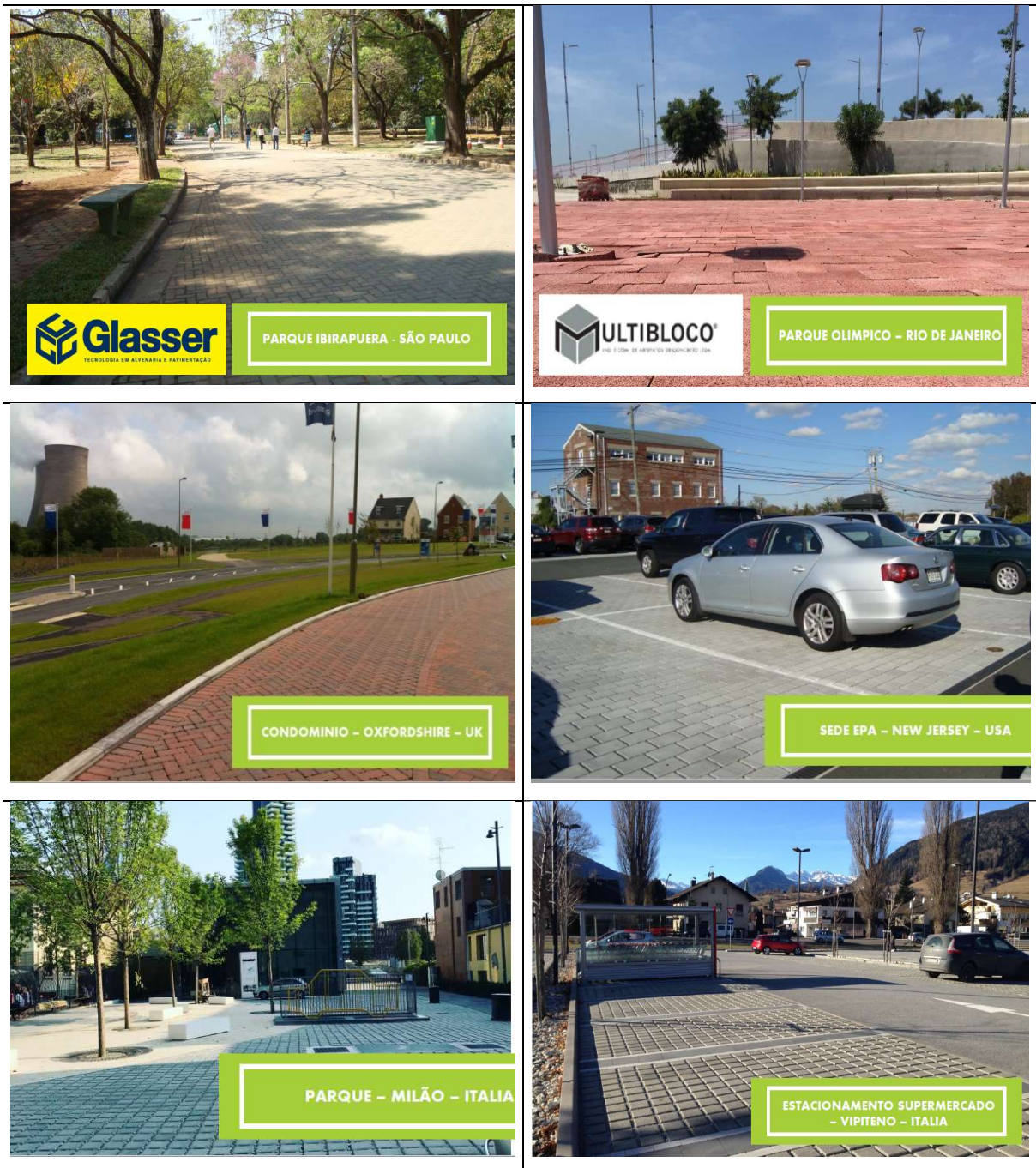
**Figura 10 – Número de estudos por bases de dados. Engineering Village (A); Scopus (B); Science Direct (C); Web of Science (D) (Cont.)**



Fonte: Autor

Na aplicação prática dos pavimentos permeáveis, isto é, na execução dos pisos para utilização, as obras com os pavimentos permeáveis construídos com o revestimento intertravado são realidades em diversos locais, inclusive no Brasil. A ABCP (2021) traz diversas aplicações, algumas delas destacadas na Figura 11.

**Figura 11 - Aplicações de pavimentos com revestimento intertravado permeável**



Fonte: Adaptado de ABCP (2021).

Como pode ser visto na Figura 11, os exemplos no Brasil são o parque de Ibirapuera (SP) e o parque Olímpico (RJ). Em outros países têm-se: um condomínio residencial em Oxfordshire (Reino Unido), a sede da *EPA* em Nova Jersey (Estados Unidos), um parque em Milão (Itália) e o estacionamento de um supermercado em Vipiteno (Itália).

### 2.2.3 Tipos de sistemas de infiltração

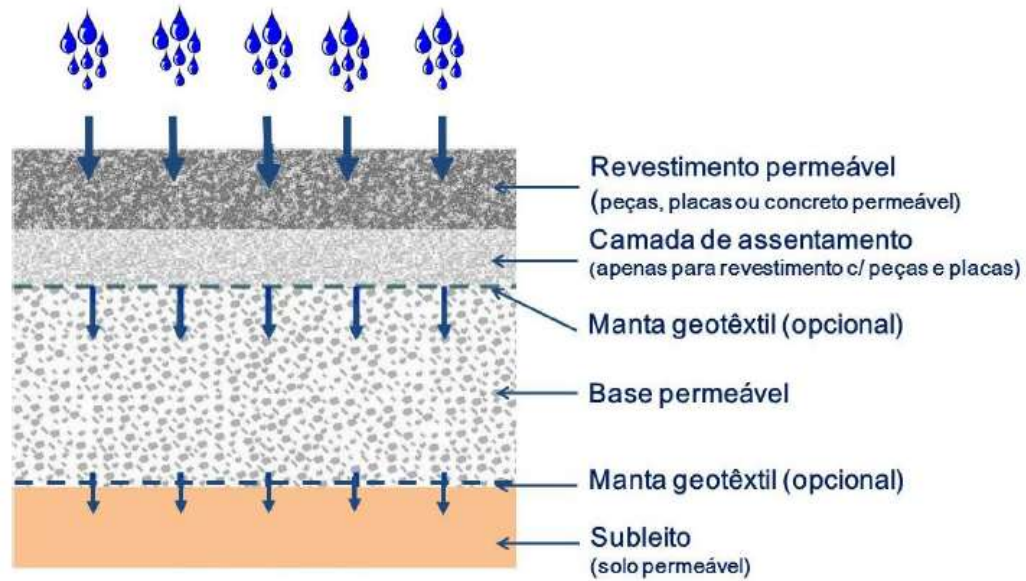
Os pavimentos permeáveis podem se diferenciar, de acordo com o tipo de sistema de infiltração, a depender de características locais, do dimensionamento e das recomendações normativas de cada projeto. Dentre as possibilidades, existem os pavimentos permeáveis com os sistemas de infiltração total, parcial ou sem infiltração, que evidenciam justamente a forma como a água que infiltra no pavimento vai se comportar em relação ao solo.

Marchioni e Silva (2011) afirmam que para a escolha do tipo de infiltração do sistema, são necessários dados que também subsidiam o dimensionamento hidráulico, e que devem ser conhecidos para tal. Esses dados são: precipitação da região, coeficiente de permeabilidade do solo e também avaliação do risco de contaminação da água que se infiltra no pavimento permeável.

De uma forma simplificada, ainda conforme Marchioni e Silva (2011), no sistema de infiltração total, toda a água da chuva é direcionada via infiltração direta ao subleito. Já no sistema de infiltração parcial, são instalados tubos de drenagem para complementar a drenagem, ocorrendo infiltração direta no subleito e saída também pelos tubos. No caso do solo ter permeabilidade muito baixa ou ocorrer risco de contaminação de água, utiliza-se o sistema sem infiltração onde toda a água é direcionada a um sistema de drenagem sem infiltração direta no subleito.

A ABNT NBR 16416 (2015) indica que no sistema de infiltração total: “toda a água precipitada alcança o subleito e se infiltra”. O INTERPAVE (2010), que é um guia para projeto, construção e manutenção de pavimentos permeáveis de blocos de concreto, produzido na Inglaterra (Reino Unido), define o sistema de infiltração total como um “sistema de descarga zero”, pois nenhuma parcela adicional de água é descarregada em sistemas de drenagem tradicionais, eliminando a necessidade de tubos, resultando em economia de custos executivos. A Figura 12 mostra esquematicamente o sistema de infiltração total.

**Figura 12 – Sistema de infiltração total**



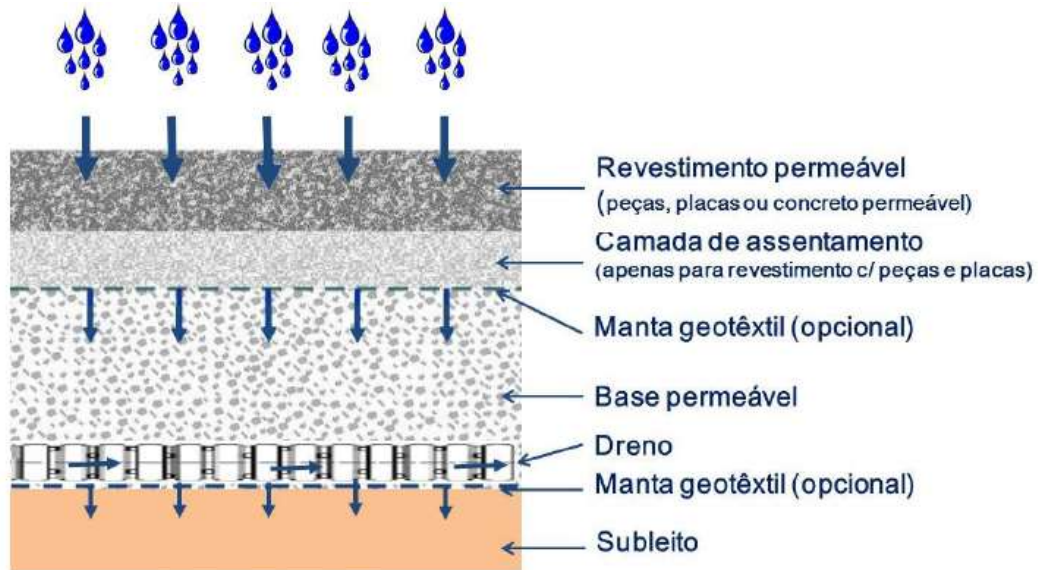
Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

Por definição da ABNT NBR 16416 (2015), o sistema de infiltração parcial é aquele em que “parte da água precipitada alcança o subleito e se infiltra, porém parte da água fica temporariamente armazenada na estrutura permeável, sendo depois removida pelo dreno”. Semelhante ao sistema de infiltração total, o parcial deve ser utilizado em situações onde o subleito existente pode não ser capaz de absorver toda a água por infiltração, portanto são instalados drenos de saída de água conectados à base ou sub-base permeável que permitem a saída da água para outros dispositivos de drenagem (INTERPAVE, 2010).

A Figura 13, apresenta o esquema do sistema de infiltração parcial. O INTERPAVE (2010) destaca que uma quantidade fixa de água se infiltra pelo sistema, onde na prática geralmente representa uma grande porcentagem do total precipitado da chuva e o excesso que é descarregado no sistema de drenagem, deve possuir uma taxa de descarga máxima dimensionada.

O sistema de infiltração parcial é, portanto, uma maneira de atingir o requisito de redução do volume de escoamento e eliminar a necessidade de armazenamento a longo prazo que possa comprometer a estabilidade mecânica do pavimento permeável.

**Figura 13 - Sistema de infiltração parcial**

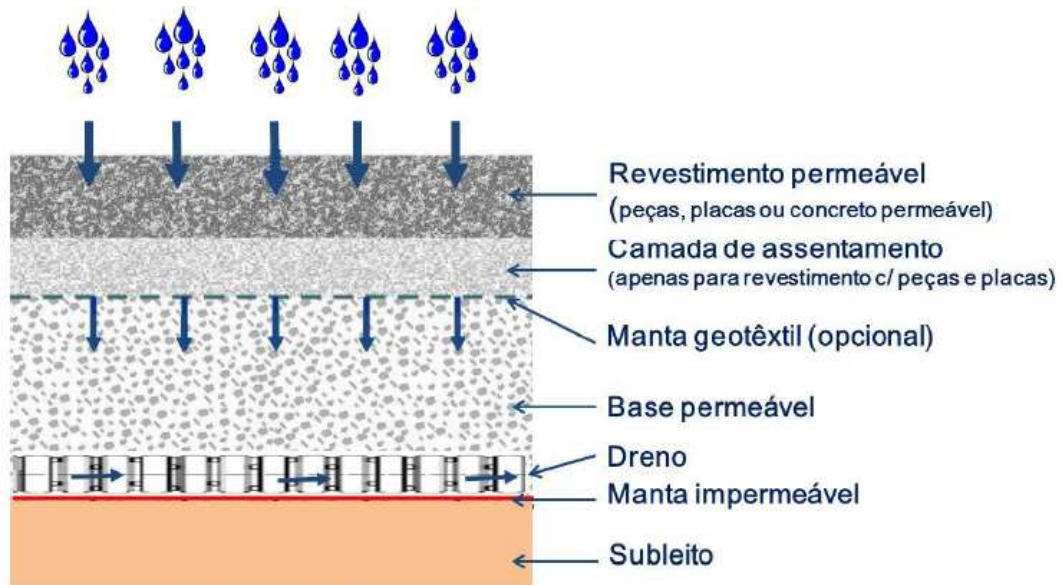


Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

Por fim, tem-se o sistema denominado sem infiltração onde “a água precipitada fica temporariamente armazenada na estrutura permeável e não infiltra no subleito, sendo depois removida pelo dreno” (ABNT NBR 16416, 2015). Nesse sistema, forma-se efetivamente um tanque de armazenamento, com uma membrana impermeável e flexível colocada no nível do subleito e nas laterais da sub-base permeável, permitindo a captação completa da água em situações onde o subleito existente apresenta baixa permeabilidade ou resistência e que seria danificado pela infiltração direta da água (INTERPAVE, 2010).

Esse sistema também pode ser utilizado para coleta de água onde simultaneamente seja necessário evitar que a água penetre no solo, como em zonas de extração de água subterrânea ou locais que possam contaminar a água na superfície do pavimento, evitando que os poluentes sejam arrastados para o subleito e, conseqüentemente, para as águas subterrâneas (Leal; Barreto; Neto, 2021). Pode-se afirmar que este sistema atua como uma zona de retenção ou detenção subterrânea e em alguns casos a água armazenada pode ser limpa, armazenada e reutilizada para outros fins não potáveis. Na Figura 14 está identificado o perfil esquemático do pavimento permeável com o sistema sem infiltração.

Figura 14 – Sistema sem infiltração



Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

Os drenos são construídos em contato com a membrana impermeável para permitir a saída da água para o sistema de drenagem ou destinação projetada, ressaltando-se que os drenos são projetados para que o água seja temporariamente armazenada no pavimento e a descarga pluvial seja retardada (INTERPAVE, 2010).

A referência normativa para o uso de cada um dos 3 tipos de sistema de infiltração, em função das condições locais, é delimitado no Quadro 6, definida pela ABNT NBR 16416 (2015).

**Quadro 6 – Sistema de infiltração do pavimento em função das condições locais**

Condições locais		Infiltração total	Infiltração parcial	Sem infiltração
Permeabilidade do subleito definida pelo coeficiente de permeabilidade $k$ (m/s)	$> 10^{-3}$	✓	✓	✓
	$10^{-3}$ a $10^{-5}$	✗	✓	✓
	$10^{-5}$ a $10^{-7}$	✗	✗	✓
Máximo registro do lençol freático a pelo menos 1,0m da camada inferior da base		✗	✗	✓
Presença de contaminantes no subleito		✗	✗	✓

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

Mesmo sendo autoexplicativo, é importante textualizar o que se encontra no Quadro 6. Portanto, percebe-se que o sistema sem infiltração pode ser utilizado em todas as condições locais mínimas necessárias para o uso dos pavimentos permeáveis, podendo ser utilizada mesmo com a presença de contaminantes, baixo coeficiente de permeabilidade ( $10^{-5}$  a  $10^{-7}$  m/s) e nível do



lençol freático a menos de 1,0m da camada inferior da base. Os sistemas de infiltração parcial e total não podem ser utilizados na presença de contaminantes ou nível do lençol freático a menos de 1,0 da camada inferior da base, diferenciando os dois sistemas apenas na vedação aos coeficientes de permeabilidade médios ( $10^{-3}$  a  $10^{-5}$  m/s) que tem no sistema de infiltração total, ou seja, este só pode ser utilizado com coeficientes de permeabilidade altos (maiores que  $10^{-3}$  m/s).

#### 2.2.4 Vantagens e desvantagens

Os pavimentos permeáveis apresentam vantagens e desvantagens discutidas por diversos autores. Portanto, algumas vantagens específicas do uso de pavimentos permeáveis segundo EPA (2005), Acioli (2005), ECOPLUIES (2009), Rowe et al. (2010), Coutinho (2011), Pinto (2011) e Xie, Akin e Shi (2019), são:

- redução do escoamento superficial em relação à superfície impermeável;
- melhoria da qualidade da água, através da redução de poluentes, durante o processo de infiltração;
- redução dos condutos da drenagem pluvial;
- diminuição dos custos do sistema de drenagem pluvial e da lâmina de água em estacionamentos e passeios;
- aumento da segurança e conforto em vias, pela diminuição de derrapagens e ruídos;
- integração à obra deste dispositivo de drenagem, não necessitando de espaço exclusivo;
- permissão da recarga do lençol freático;
- promoção do amortecimento dos picos de cheia com o aumento do tempo de concentração da bacia onde o dispositivo está instalado devido à redução do volume de escoamento superficial;
- controle da erosão do solo;
- mitigação do efeito ilha de calor;
- existência, atualmente, de vários estudos referentes ao monitoramento, modelagem, simulação numérica e execução em escala real de pavimentos permeáveis, trazendo segurança e eficiência aos projetos e execuções.

As desvantagens específicas dos pavimentos permeáveis, ainda conforme EPA (2005), Acioli (2005), ECOPLUIES (2009), Rowe *et al.* (2010), Coutinho (2011), Pinto (2011) e Xie, Akin e Shi (2019), incluem:

- risco do pavimento tornar-se obstruído devido à colmatagem, reduzindo sua eficiência;
- risco de contaminação do aquífero, dependendo das condições do solo, da suscetibilidade do aquífero e do sistema de infiltração do pavimento adotado;
- maior restrição de uso em regiões de clima frio, devido ao entupimento e trincagem pela neve e em regiões com altas taxas de erosão eólica, por causa do grande acúmulo de sedimentos na superfície;
- limitação de uso à tráfegos pesados;
- em comparação ao sistema convencional, menor conhecimento dos engenheiros com relação à execução do sistema, principalmente em relação aos níveis de compactação das camadas, dos requisitos e especificações necessários;
- manutenção periódica do sistema para evitar que fique colmatado com o tempo, principalmente com lavagem à vácuo;
- maior custo direto da construção em relação ao sistema de pavimentação convencional (sem considerar a vantagem da redução dos condutos);
- possibilidade de entrada de contaminantes no lençol freático;
- necessidade de inspeções regulares para execução da obra com a finalidade de prevenir a obstrução prematura do pavimento;
- em caso de obstrução (entupimento) tanto da camada superficial, quanto da estrutura do reservatório, faz-se necessária a reabilitação do pavimento.

Xie, Akin e Shi (2019) afirmam também que é difícil otimizar simultaneamente as propriedades mecânicas, de durabilidade e o desempenho de infiltração dos pavimentos permeáveis de concreto. Por isso, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias e estudos para ajudar a melhorar a durabilidade dos pavimentos permeáveis sem aumentar significativamente seus requisitos de manutenção ou sacrificar suas propriedades de infiltração. Os autores ressaltam ainda que os danos por congelamento e descongelamento, e o fenômeno de entupimento ainda criam problemas para a implementação em massa de pavimentos permeáveis de concreto.

### 2.2.5 Materiais utilizados nos revestimentos

Os pavimentos permeáveis possuem suas camadas bem definidas, conforme apresentado. No que se refere ao revestimento, que é justamente a camada superficial e aparente do pavimento receptor direto da carga de tráfego e que deve permitir que a água se infiltre, existem alguns materiais que podem ser utilizados. Alguns destes estão descritos na respectiva norma brasileira ABNT NBR 16416 (2015). No entanto, existem outros materiais de revestimento que podem ser utilizados e têm aplicação em estudos e no mercado.

De acordo com a ABNT NBR 16416 (2015), são tipologias de revestimento:

- Pavimento de placas de concreto permeável: onde a percolação de água ocorre pelo concreto da placa, mas o revestimento não apresenta intertravamento (Figura 15a);
- Pavimento de concreto permeável: a percolação da água ocorre pelo concreto moldado in loco, com redução dos agregados miúdos e estrutura de vazios interligada (Figura 15b);
- Pavimento intertravado permeável: subdivide-se em 3 tipos, peças de concreto permeável onde a percolação ocorre através delas, peças de concreto com juntas alargadas onde a percolação ocorre por juntas entre as peças, e por último, as peças de concreto com áreas vazadas onde a percolação ocorre pelas áreas vazadas das peças (Figura 15c).

Ferguson (2005), ao destacar o pavimento intertravado permeável, indica que ele consiste em unidades sólidas de concreto colocadas lado a lado para suportar cargas de tráfego permitindo a infiltração de água através de juntas alargadas, vazios abertos ou através dos seus próprios poros. As unidades são instaladas em uma camada de assentamento com agregado graúdo e ressalta-se que todas as juntas dos pavimentos são preenchidas com material granular drenante.

Sansalone *et al.* (2012) destacam o concreto permeável como uma estrutura permeável que permite que a água se infiltre em sentido contrário ao proposto pelo concreto convencional, onde os vazios de ar devem ser minimizados. Essa estrutura permeável é alcançada removendo o material fino da mistura e usando agregados de granulometria aberta. Numerosas pesquisas foram realizadas em concreto permeável para caracterização de testagem, métodos de mistura e para melhorar as propriedades do concreto, sabendo que é importante encontrar o equilíbrio entre o número de vazios e a resistência para um bom desempenho (Marchioni, 2018).

Além dos tipos de revestimentos permeáveis descritos e que estão na norma de pavimento permeável nacional, existem outros que, apesar de não constar, são usuais como o concreto asfáltico poroso (Figura 15d), as peças plásticas modulares (geocélulas de PEAD) (Figura 15f) e os blocos de concreto vazados (Figura 15e), este último sendo, na verdade, uma outra interpretação das peças de concreto com áreas vazadas.

O concreto asfáltico poroso é a mistura entre ligante betuminoso e agregados de tamanho uniforme. Ele é uma variação do convencional concreto asfáltico que é um material relativamente barato e aplicável, contudo com a propriedade de ser permeável. No entanto, este tipo de revestimento é mais susceptível à colmatção causada pelo próprio ligante, quando este é muito fluido, ou a união ligante-agregado é fraca, gerando a percolação gradual dele na superfície do revestimento através dos poros, entupindo-os (Virgillis, 2009).

Aditivos poliméricos podem ser usados para melhorar as características do revestimento, estabilizando os ligantes betuminosos, assegurando maior vida útil ao concreto asfáltico poroso e permitindo o uso em tráfegos mais pesados (Knappenberger *et al.*, 2017).

Os blocos de concreto vazados são unidades projetadas com células ou grandes aberturas que permitem o preenchimento destas com agregados graúdos ou gramas. Os blocos são implantados lado a lado resultando numa superfície semelhante a uma grelha ou desenho simétrico em ângulo reto ou diagonal. Eles são duráveis, possuem considerável vida útil e bom suporte de carregamentos mais pesados, mas são revestimentos menos econômicos (Virgillis, 2009).

Como a percolação da água ocorre justamente pelas áreas vazadas das peças que são preenchidas, pode ser considerado uma interpretação do pavimento intertravado permeável com peças de concreto com áreas vazadas. No entanto, os blocos vazados não podem ser considerados como tal pela dimensão da abertura, pois diz a norma ABNT NBR 16416 (2015): “A área de percolação das juntas alargadas ou das áreas vazadas entre peças de concreto deve corresponder a uma área compreendida no intervalo entre 7% a 15% em relação à área total”.

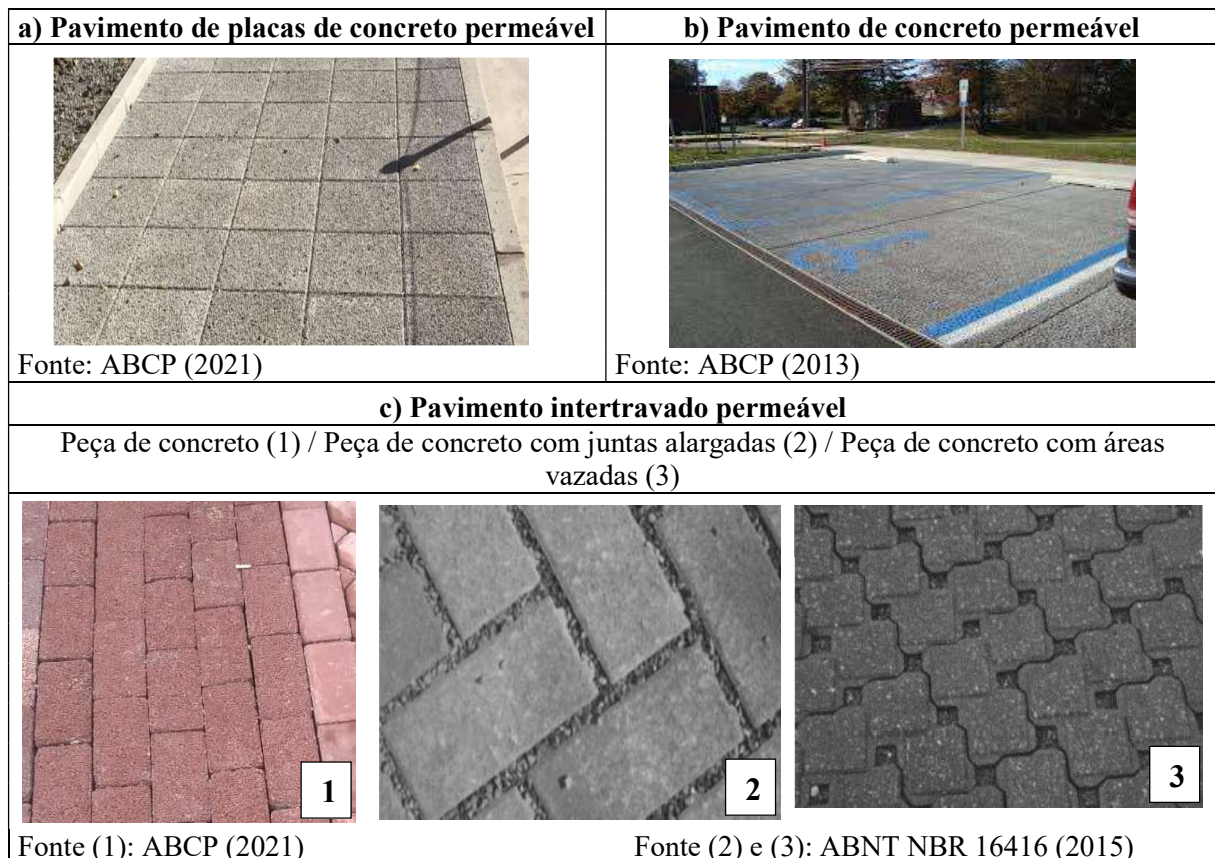
Os revestimentos permeáveis compostos por peças plásticas modulares são constituídos com Polietileno de Alta Densidade (PEAD) que é um polímero plástico, geralmente reciclado. A produção de forma geral é com tiras de PEAD fortemente unidas formando células contíguas

tridimensionais. O formato que resultará a geocélula é semelhante a uma colmeia, com variações a depender de quem produz. As células devem ser encaixadas ou unidas de forma que o resultado seja um revestimento único que deve ser preenchido com brita ou grama (Virgillis, 2009).

Este tipo de revestimento possui produtores nacionais como a empresa Ecotelhado, onde as peças plásticas modulares são comercialmente denominadas ecopavimento permeável drenante. A empresa informa que o ecopavimento é um piso que deve ser instalado sobre uma superfície permeável, permitindo a passagem da água, e é produzido com grelhas alveoladas de PEAD reciclado que devem suportar um peso compatível com a base onde será colocada, sendo ideal para a pavimentação de locais de tráfego lento (ECOTELHADO, 2022).

Outro produtor, este internacional e consolidado nos Estados Unidos, é o pavimentador permeável de grades de plástico Truegrid, que também consiste em peças plásticas modulares de PEAD, com especificações de 3 tipologias disponíveis (Pro lite, Pro plus, Root TM), diferenciando-se no tipo de aplicação e suporte de carga (TRUEGRIDPAVER, 2022).

**Figura 15 - Tipos de materiais utilizados nos pavimentos permeáveis**



**Figura 15 - Tipos de materiais utilizados nos pavimentos permeáveis (Cont.)**

<b>d) Concreto asfáltico poroso</b>	<b>e) Blocos de concreto vazados</b>
 <p data-bbox="236 633 568 663">Fonte: USP Imagens (2022)</p>	 <p data-bbox="837 633 1107 663">Fonte: Virgillis (2009)</p>
<b>f) Peças plásticas modulares - PEAD reciclado</b>	
 <p data-bbox="236 1043 604 1072">Fonte: ECOTELHADO (2022)</p>	 <p data-bbox="837 1043 1257 1072">Fonte: TRUEGRIDPAVER (2022)</p>

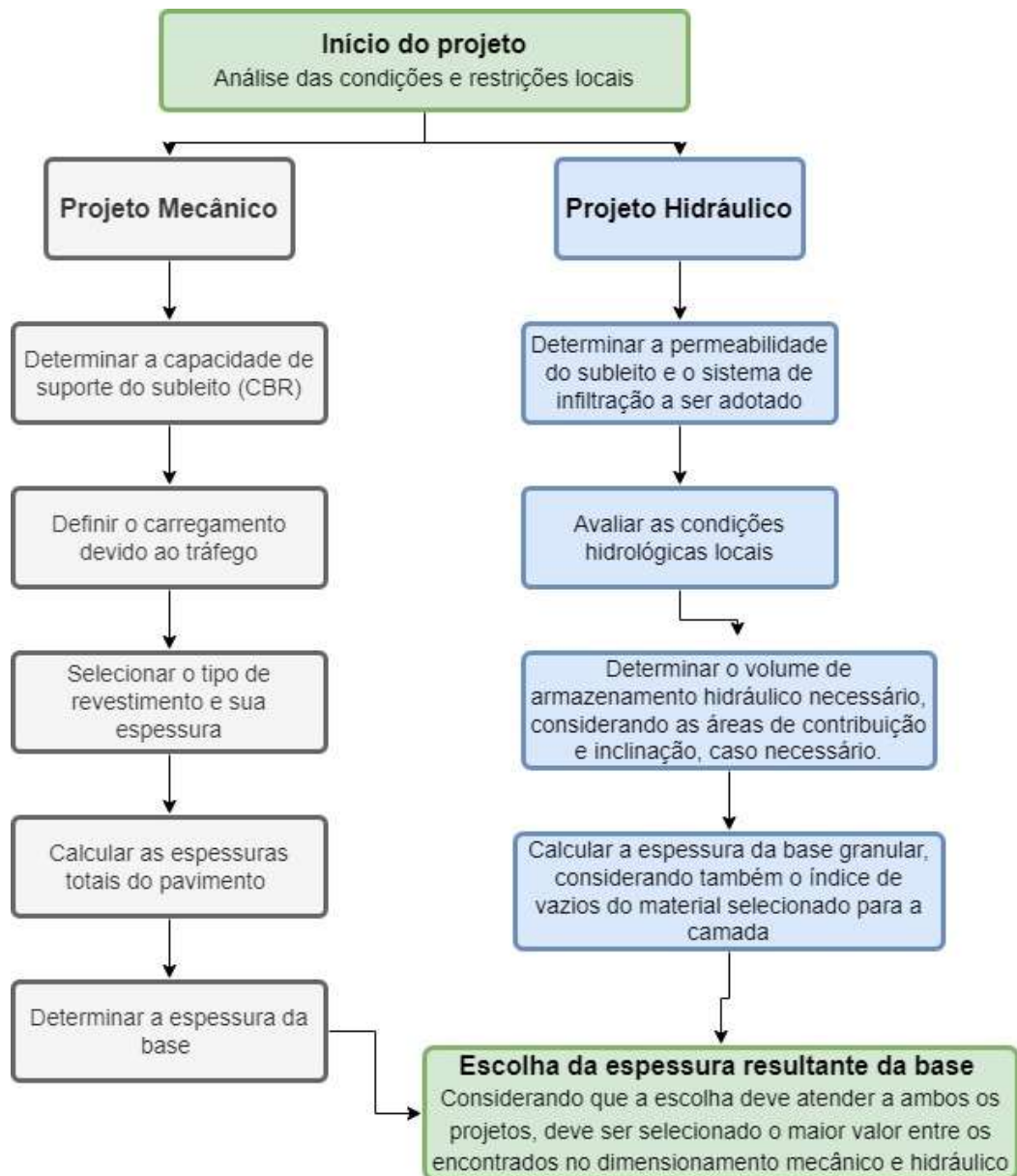
Fonte: Autor

### 2.2.6 Considerações sobre projeto, execução, manutenção e conservação

Para projetar um pavimento permeável são necessárias duas abordagens: o projeto mecânico, que também é necessário para o projeto de pavimentos convencionais, e o projeto hidráulico/hidrológico. Este leva em consideração o volume de água infiltrada e sua vazão, as condições locais hidrológicas e a permeabilidade do solo, enquanto o projeto mecânico considera as cargas de tráfego e o suporte do subleito, levando em consideração a resistência estrutural do pavimento. Para definição da espessura final da estrutura, o projeto estabelecerá aquela que atenda a ambos os critérios, ou seja, a maior entre as espessuras encontradas nos dois projetos (Marchioni, 2018).

No início do projeto, é necessário a definição das restrições do local. Marchioni (2018) destaca o potencial de contaminação das água subterrâneas devido à infiltração, a distância do lençol freático, a presença de aquíferos e a descarga de escoamento permitida para poder definir o perfil e o sistema de infiltração adotado. Dentre os possíveis: infiltração total, parcial ou sem infiltração. A Figura 16 apresenta um fluxograma esquemático sobre o projeto de pavimentos permeáveis.

**Figura 16 – Fluxograma esquemático do projeto de um pavimento permeável**



Fonte: Autor. Adaptado de Marchioni (2018)

É possível identificar, através do fluxograma da Figura 16, as etapas para cada um dos projetos, mecânico e hidráulico, com o resultado final da espessura resultante da base do pavimento. Vale destacar, no projeto mecânico, que a determinação da capacidade de suporte do subleito, segundo indica a ABNT NBR 16416 (2015), é realizado através do ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) ou ISC (Índice de Suporte Califórnia), preconizado pela ABNT NBR 9895 (2016).

Das etapas do projeto hidráulico, destaca-se a determinação de permeabilidade do subleito que, conforme a ABNT NBR 16416 (2015,) deve ser, a depender do tipo de solo, através dos ensaios

preconizados pela ABNT NBR 14545 (2000) para solos argilosos e ABNT NBR 13292 (1995) para solos granulares. Quanto a etapa de avaliação das condições hidrológicas, dentre as outras condicionantes, são imprescindíveis os dados de precipitação com a definição de duração de chuva intensa e tempo de retorno de projeto.

Para executar um pavimento permeável algumas etapas e cuidados devem ser tomados para evitar problemas. Marchioni e Silva (2011) definem 6 etapas para a correta execução do pavimento intertravado permeável: preparação do subleito, posicionamento da manta geotêxtil não tecido, execução das camadas de sub-base e base, assentamento das peças pré-moldadas de concreto, rejuntamento e compactação. Os autores destacam que a execução é similar ao convencional, diferenciando-se nos materiais utilizados.

Na preparação do subleito que pode ser constituído pelo solo natural do local ou proveniente de empréstimo, toda a camada deve estar limpa e é necessária a verificação de cotas e caimentos de projeto, bem como execução da tubulação de drenagem, quando existente, direcionada para uma caixa de retenção ou sistema de drenagem. O solo deve apresentar ISC maior que 2% e expansão volumétrica menor ou igual a 2%. No posicionamento da manta geotêxtil não tecido, ela deve ser posicionada imediatamente acima do subleito, deixando sobras nas laterais de 0,3m para solos com  $ISC > 5$  e de 0,6m para solos mais fracos com menores ISC (Marchioni; Silva, 2011).

Na execução da sub-base e base, deve ser verificado se o material atende a granulometria recomendada e recomenda-se o espalhamento de 10 cm a 15 cm e compactada usando uma placa vibratória ou um rolo compactador. Quanto à camada de assentamento, antes de iniciar devem ser posicionadas as contenções laterais que possam garantir a estabilidade horizontal do sistema, impedindo seu deslocamento. A camada de assentamento deve ser espalhada uniformemente com uma espessura final de até 5 cm e o material é então nivelado manualmente por meio de régua metálica ou de forma mecanizada. Após o nivelamento, a camada não deve receber tráfego de pedestres ou equipamentos antes da instalação das peças de concreto (Marchioni; Silva, 2011).

Na etapa de rejuntamento, é preciso espalhar o respectivo material seco sobre a camada de revestimento que está assente, formando uma camada fina e uniforme em toda a área; em sequência executa-se a varrição do material de rejuntamento até que as juntas entre as peças e



com a contenção lateral sejam preenchidas sem atingir o topo das peças (5 mm abaixo). Por fim, a etapa de compactação é executada utilizando-se placas vibratórias, pois este equipamento promove a acomodação das peças na camada de assentamento, sendo mantida a regularidade da camada de revestimento sem danificar as peças de concreto. A compactação deve ser realizada com sobreposição entre 15 cm a 20 cm, alternando a execução da compactação com o espalhamento do material de rejuntamento (Marchioni; Silva, 2011).

Em relação a vida útil, Marchioni (2018) descreve que um pavimento tradicional normalmente possui de 10 a 20 anos, a depender da carga de tráfego de veículos, e que no pavimento permeável há um importante efeito do entupimento causado pelos sedimentos depositados no pavimento que podem reduzir esta vida útil. Devido a isto, a autora informa que é necessário o entendimento e a previsibilidade cada vez maior desse comportamento e a busca de mais soluções para atenuar e recuperar a capacidade de infiltração do pavimento.

No entanto, Weiss *et al.* (2019) destaca que, como os pavimentos permeáveis geralmente possuem elevadas taxas de infiltração inicial, sendo suficientes para altas intensidades pluviométricas, o entupimento deve ser severo para que o pavimento perca sua funcionalidade permeável. Mas, a ausência de manutenção regular pode ocasionar entupimentos que resultem em taxas de infiltração reduzidas em níveis inaceitáveis. Borgwardt (2006) testou diversos pavimentos permeáveis utilizando um infiltrômetro e concluiu que após 10 anos um pavimento permeável pode perder até 80% de sua taxa de infiltração inicial.

Segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2011), a colmatção de uma estrutura de infiltração é resultado da deposição de material particulado de finos no interior da estrutura, preenchendo os vazios do meio poroso de maneira que as partículas maiores ficam retidas nas camadas superiores e as menores são carregadas para o estrato mais profundo, causando o entupimento. Coutinho (2011) indica que a velocidade de deposição dos sedimentos no pavimento depende do volume de tráfego e da existência próxima de jardins, áreas sujeitas ao carreamento de sólidos e árvores que são fontes de sedimentos. Nestes casos, medidas como varrições frequentes reduzem o problema de forma eficaz.

De maneira geral, a colmatção é o que faz com que o meio poroso reduza sua capacidade de condutividade hidráulica através do tempo, de maneira lenta e progressiva. A longo prazo, a infiltração de águas pluviais na estrutura pode tender a ser nula, pois o sistema perderá sua função drenante comportando-se como estrutura impermeável (Virgillis, 2009).

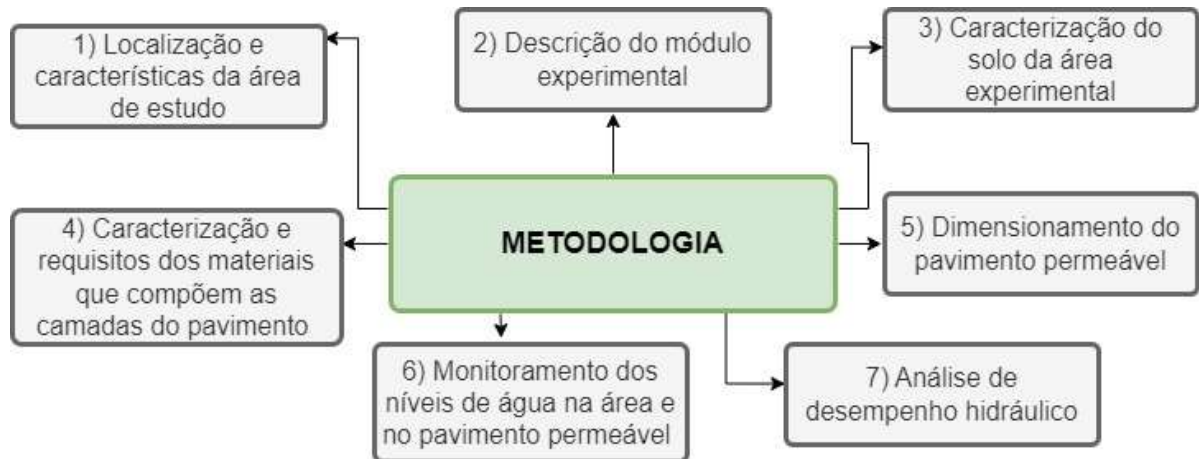
Acioli (2005), Coutinho (2011) e Marchioni (2018) ressaltam as recomendações de manutenções periódicas com o objetivo de manter o bom desempenho do pavimento permeável devido, justamente, ao risco de colmatação. Dentre elas estão o escovamento, jato de ar ou água, varrição mecânica com equipamentos e aspirações, que devem ocorrer com frequência mínima de uma vez por ano, podendo chegar até 4 vezes, a depender do entorno do pavimento, priorizando a realização após eventos chuvosos, pois as poças formadas pelo acúmulo de água evidenciarão os pontos mais críticos de entupimento.

A ABNT NBR 16416 (2015) recomenda a verificação periódica do desempenho do pavimento permeável quanto à permeabilidade através do ensaio especificado pela norma, com um anel de infiltração. Quando, após um período de utilização, o pavimento apresentar uma redução no coeficiente de permeabilidade ( $\leq 10^{-5}$  m/s), devem ser executadas ações de limpeza com o intuito de recuperação da capacidade permeável. Após a execução, realiza-se novamente o ensaio especificado para verificação da permeabilidade, e as áreas que receberam as atividades de limpeza devem apresentar, no mínimo, 80% do coeficiente de permeabilidade especificado para o pavimento recém construído ( $> 10^{-3}$  m/s).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia da pesquisa seguiu as etapas e a cronologia destacada na Figura 17.

**Figura 17 – Etapas da metodologia**



Fonte: Autor

#### 3.1 Localização e características da área de estudo

O pavimento permeável foi executado na Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI-UPE), situada no bairro da Madalena, na cidade de Recife, em Pernambuco. As coordenadas geográficas do local indicam latitude S 8° 03' 34" e longitude W 34° 54' 12". A Figura 18 indica a localização da POLI delimitada pelas vias urbanas: Rua Prof. Benedito Monteiro e Rua Benfica.

A escolha desse campo experimental na POLI foi devido à disponibilidade de área própria da instituição de ensino onde está vinculado o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Outro fator de escolha foi a possibilidade, que tornou-se realidade, de adaptação do projeto da reforma em curso para o Campus. Nele era previsto, dentre outras intervenções, uma repaginação de parte do piso externo da POLI com destinação ao uso de pedestres, mas com tipologia de pavimentação convencional. No entanto, após diálogos ficou definido que a área destinada a pedestres seria executada com pavimento permeável. Este local também foi escolhido para que o estudo justifique cientificamente a escolha e ratifique-a.

Figura 18 – Localização da POLI-UPE em Mapa



Fonte: Autor. Adaptado do ESIG – Informações geográficas do Recife (2022).

A Figura 19 apresenta um recorte do projeto de reforma na POLI, onde aparece a área representativa deste estudo delimitada em hachura, sendo uma área retangular de 27 m<sup>2</sup> (2,7m x 10m) com tipologia de utilização para tráfego de pedestres em pavimento permeável.

Figura 19 – Projeto de reforma na POLI – Recorte com a área de estudo



Fonte: Autor

A respeito da cidade de Recife, que é a capital do Estado de Pernambuco, Cabral e Alencar (2005) descrevem que ela se situa em uma grande planície de baixa altitude, com variação de cotas de 1m a 10m acima do nível do mar, contornada por uma cadeia de morros baixos com cotas de até 150m de altitude. A planície é formada por sedimentos fluvio-marinhos e o contorno da linha de morros é uma geoconformação com feição de anfiteatro.

A cidade está localizada na zona fisiográfica do litoral-mata atlântica e possui clima quente e úmido, com precipitação pluviométrica abundante em relação à região nordeste do Brasil, apresentando um período mais chuvoso distribuído entre março e agosto e um período mais seco, compreendido de setembro a fevereiro. Do ponto de vista hidrográfico, a cidade é banhada pelo rio Capibaribe, que atravessa a cidade do oeste para o leste e também pelos rios Beberibe, ao norte, e Tejipió, ao sul. Todos eles possuem vários afluentes e canais de interligação, formando uma região estuariana compartilhada. Devido à este estuário que meandra pela planície, interligado por diversas pontes, a cidade do Recife é conhecida como a Veneza brasileira (Cabral; Alencar, 2005).

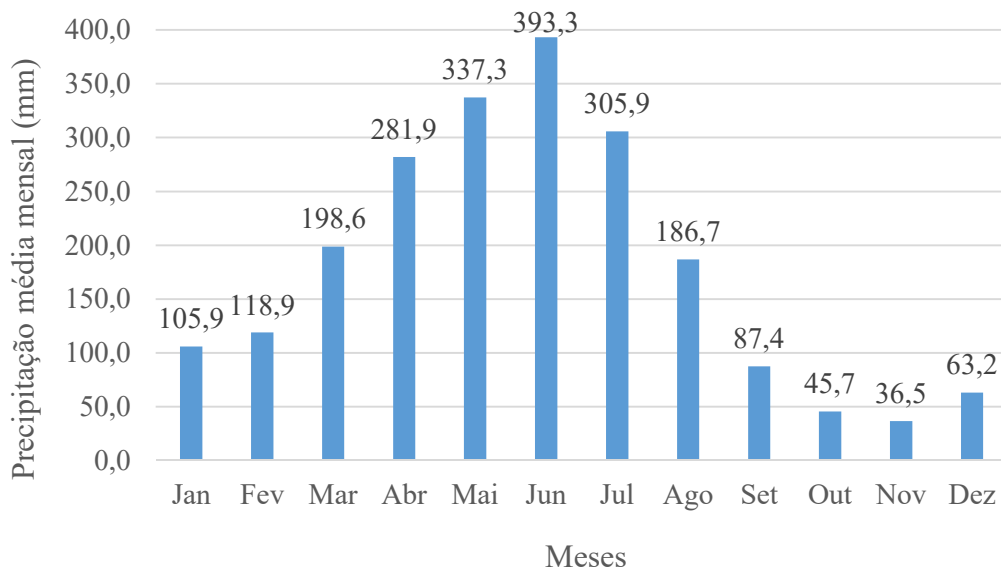
Para este estudo, é importante um enfoque na precipitação pluviométrica do local. Por isso, foi analisada uma série histórica de precipitações do posto pluviométrico localizado no bairro da Várzea, no período de jan/1994 a nov/2021, e do posto pluviométrico localizado na CODECIPE (Coordenadoria de Defesa Civil do Estado de Pernambuco), no bairro de Santo Amaro, no período de dez/2021 a dez/2022. O posto pluviométrico da Várzea foi escolhido devido à completude e ao número de dados para o período analisado, e o posto pluviométrico da CODECIPE, para o período anual mais recente, tendo em vista o descontinuação dos dados do posto da Várzea desde dezembro de 2021. Todos os dados foram coletados através do site da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

Como resultado, no período de 1994 a 2022, a média anual foi de 2164,4 mm, com mínimo de 1255,4 mm no ano de 1998 e máximo de 3482,0 mm no ano de 2000. A Figura 20 apresenta as médias mensais para o período analisado, indicando os meses de abril, maio, junho e julho como os mais chuvosos durante o ano. Sendo o mês de junho o mais chuvoso e o mês de novembro o menos chuvoso na região (APAC, 2023).

A cidade de Recife, por se tratar de uma planície urbana costeira, com uma urbanização desordenada, índices pluviométricos elevados e devido à proximidade altimétrica com o nível do mar, tem o sistema de drenagem local influenciado e vulnerável à variabilidade diária das

marés (Silva Junior *et al.*, 2020). Vale destacar que algumas áreas da cidade apresentam alagamento apenas com uma variação de maré alta em níveis elevados. Então, quando tem-se a associação deste fato com um evento chuvoso, o alagamento urbano tende a maiores proporções.

**Figura 20 – Precipitação média mensal em Recife-PE, no período de 1994 a 2022**



Fonte: Autor. Dados: APAC (2023)

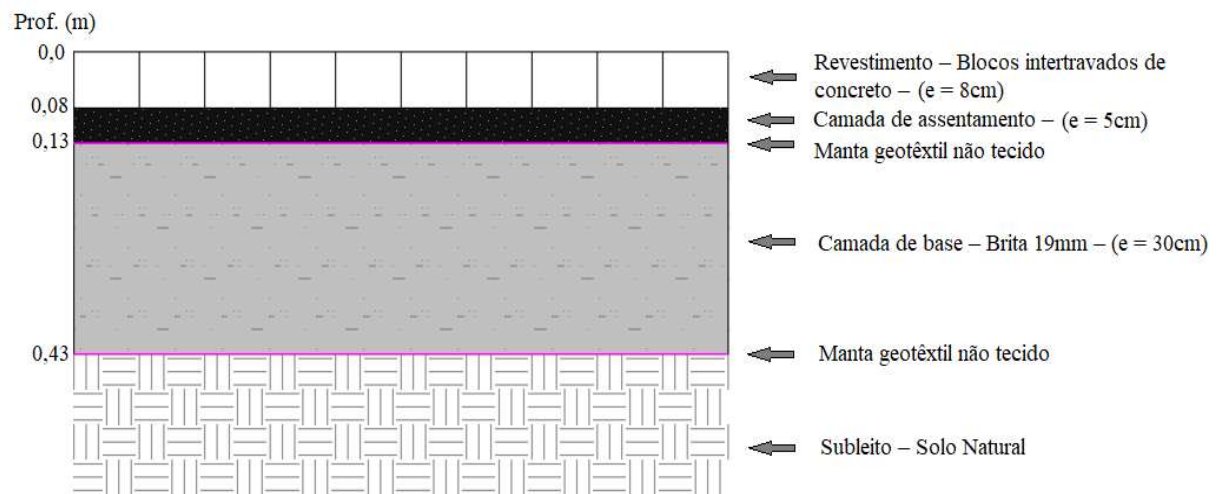
### 3.2 Descrição do módulo experimental

Para a correta execução da pavimentação permeável, deve-se dimensionar o perfil do pavimento através dos dados coletados inicialmente e encontrar as espessuras das camadas componentes da estrutura. No entanto, este estudo parte de um perfil prévio definido para execução da obra de reforma da POLI. Esse perfil, que compôs a licitação pública para execução da obra, foi embasado em estudos anteriores de pavimentos permeáveis experimentais realizados na POLI por Almeida (2017) e Silva (2022).

O módulo experimental de 27m<sup>2</sup> que foi estudado é uma parte da área de execução da obra. O dimensionamento do pavimento permeável nesse estudo objetivou avaliar se o perfil escolhido e executado está em conformidade com o que propõe a norma nacional de pavimentos permeáveis de concreto, a ABNT NBR 16416 (2015). O perfil definido é apresentado na Figura 21, por metro de largura do pavimento.

O perfil, por ordem crescente de profundidade, é composto por: revestimento, com blocos de concreto intertravado permeável retangulares com 8 cm de altura; uma camada de assentamento com pó de pedra, com 5 cm de altura; uma camada de manta geotêxtil não tecido (comercialmente conhecida como Bidim); a camada de base com brita 19 mm, possuindo 30 cm de altura; outra camada de manta geotêxtil não tecido (Bidim); e o subleito de suporte com o material natural do terreno. Destaca-se que o processo executivo com o revestimento em blocos de concreto permeável é sem as juntas alargadas, sendo do tipo junta seca (sem rejuntamento) e a infiltração ocorre através das próprias peças permeáveis.

**Figura 21 - Perfil do pavimento experimental**



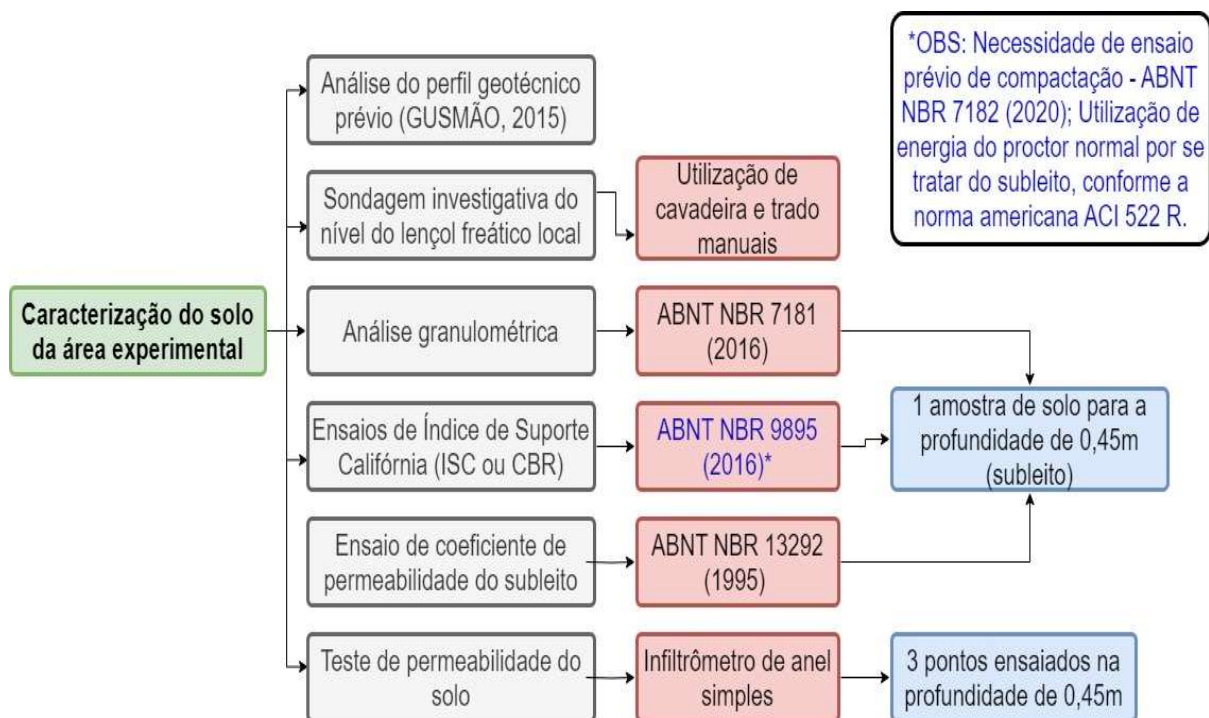
Fonte: Autor

O perfil completo do pavimento experimental tem 43 cm de espessura, tipologia de uso para tráfego de pedestres, como anteriormente destacado, e com o sistema de infiltração total, ou seja, toda água precipitada infiltra para o subleito, sem o uso de drenos. Devido ao fato deste estudo avaliar cientificamente o perfil escolhido para o projeto de reforma da POLI, as etapas de caracterização do solo da área experimental baseou-se na profundidade de 0,45 m, pelo fato de ser justamente a interface onde termina a base e inicia o subleito de solo natural, necessitando então caracterizar esse subleito.

### 3.3 Caracterização do solo da área experimental

Com a intenção de obtenção do conhecimento técnico sobre as características do solo da região de estudo, foram realizados: análise de um perfil geotécnico da área, ensaios laboratoriais de caracterização do solo por granulometria, do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e da permeabilidade do subleito, além do ensaio de campo de permeabilidade do solo. A Figura 22 apresenta um fluxograma representativo das etapas de caracterização do solo.

**Figura 22 – Fluxograma das etapas de caracterização do solo da área experimental**



Fonte: Autor

#### 3.3.1 Estudo geotécnico

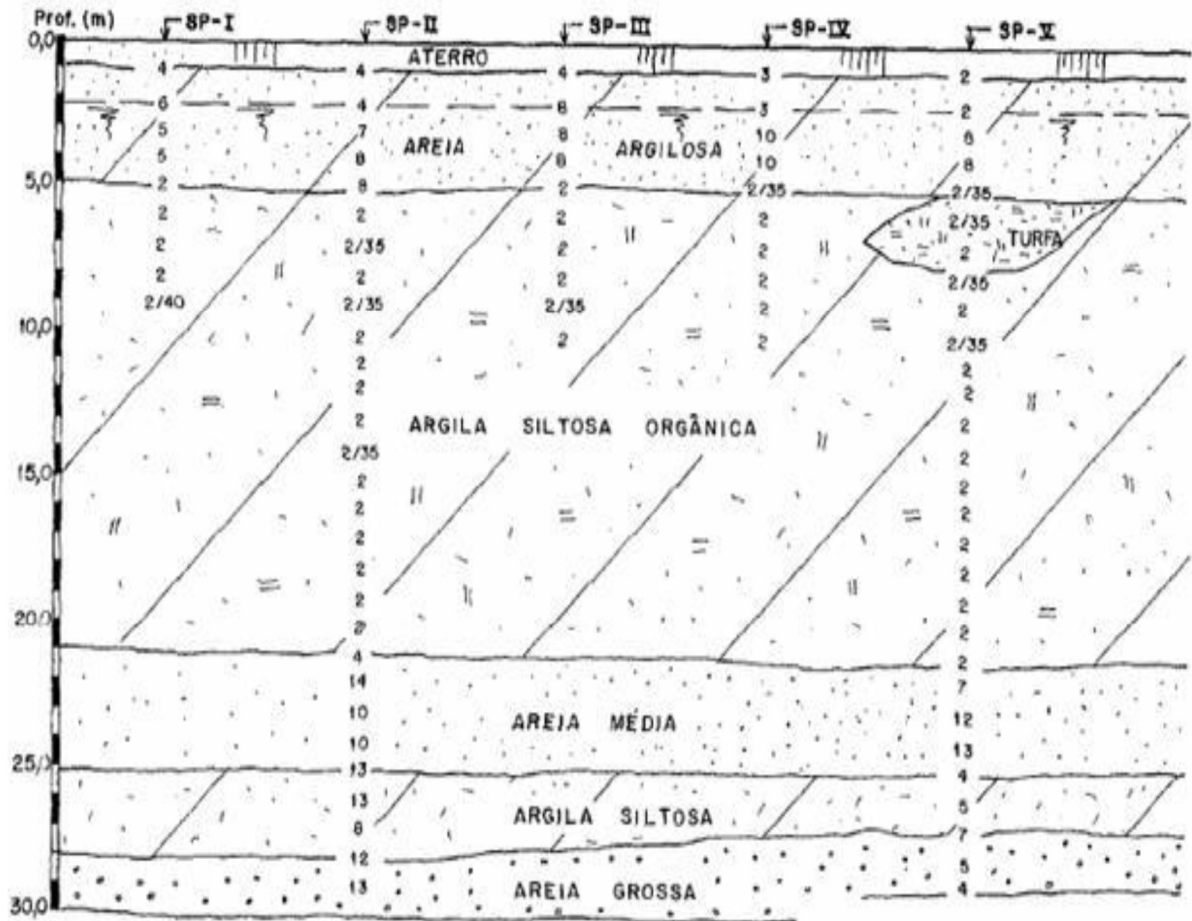
Existe um perfil geotécnico do terreno da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI-UPE), desenvolvido por Gusmão (2015), de onde foi possível realizar uma análise prévia da composição do solo existente no campus da universidade, em diferentes profundidades. É possível identificar, através da Figura 23, que o perfil indica um material de aterro com 1,0 m de profundidade, seguido de uma areia argilosa até os 5,0 m.

Após, é observado uma camada de argila siltosa orgânica até os 21,0 m; em sequência: areia média até os 25,0 m, argila siltosa até os 28,0 m, e areia grossa até os 30,0 m de profundidade.



É possível perceber que a resistência desse solo é crescente até os 5,0 m iniciais e depois decai até 21,0 m devido a camada de argila siltosa orgânica, voltando a crescer após os 21,0 m. O nível do lençol freático no perfil geotécnico era de 2,0 m de profundidade.

Figura 23 – Perfil geotécnico da POLI-UPE



Fonte: Gusmão (2015)

### 3.3.2 Nível do lençol freático local

Foi realizada uma sondagem em outubro de 2022, utilizando pá, cavadeira tipo concha e trado, para identificação da profundidade do nível d'água no local. A Figura 24 mostra a execução do procedimento realizado, e o nível do lençol freático no local estava na profundidade de 1,87 m (em 04/10/2022). Destaca-se que a variação do nível d'água do lençol freático ao longo do tempo foi monitorada com medições periódicas através dos piezômetros instalados no local.

**Figura 24 - Sondagem investigativa do nível do lençol freático local. Perfuração com o trado manual (a), retirada do trado com material (b), aferição do nível d'água do lençol freático (c)**



Fonte: Autor

### 3.3.3 Análise granulométrica

A caracterização do solo no local, conforme sua composição percentual de argila, silte, areia e pedregulho, foi realizada através do ensaio granulométrico, por meio de peneiramento e sedimentação, conforme determina a ABNT NBR 7181 (2016) – Solo – Análise granulométrica. Para isto, foi coletada uma amostra deformada do solo na profundidade 0,45 m (subleito do pavimento permeável). A amostra total foi repartida por quarteamento sendo indicado na Figura 25a o resultado da repartição. Logo após, foi subdividida e preparada para cada ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR 6457 (2016) – Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaio de caracterização.

A partir das amostras subdivididas (Figura 25b), além da análise granulométrica, todos os outros ensaios laboratoriais referente ao solo foram realizados no laboratório de Geotecnia da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco).

**Figura 25 - Amostra de solo quarteada (a) e subdivisões amostrais (b)**



Fonte: Autor

A realização do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação está apresentada na Figura 26. Destaca-se que, através do resultado da distribuição granulométrica do solo em percentuais de argila, silte, areia e pedregulho, foi possível entender a composição do solo e definir a tipologia como granular para realizar um importante ensaio do dimensionamento hidráulico, a permeabilidade do solo. Tendo em vista que, a depender se o solo é granular ou argiloso, utiliza-se o ensaio de permeabilidade à carga constante ou à carga variável, respectivamente.

**Figura 26 - Realização do ensaio de granulometria. Preparação (a), sedimentação (b), peneiramento grosso (c) e peneiramento fino (d)**



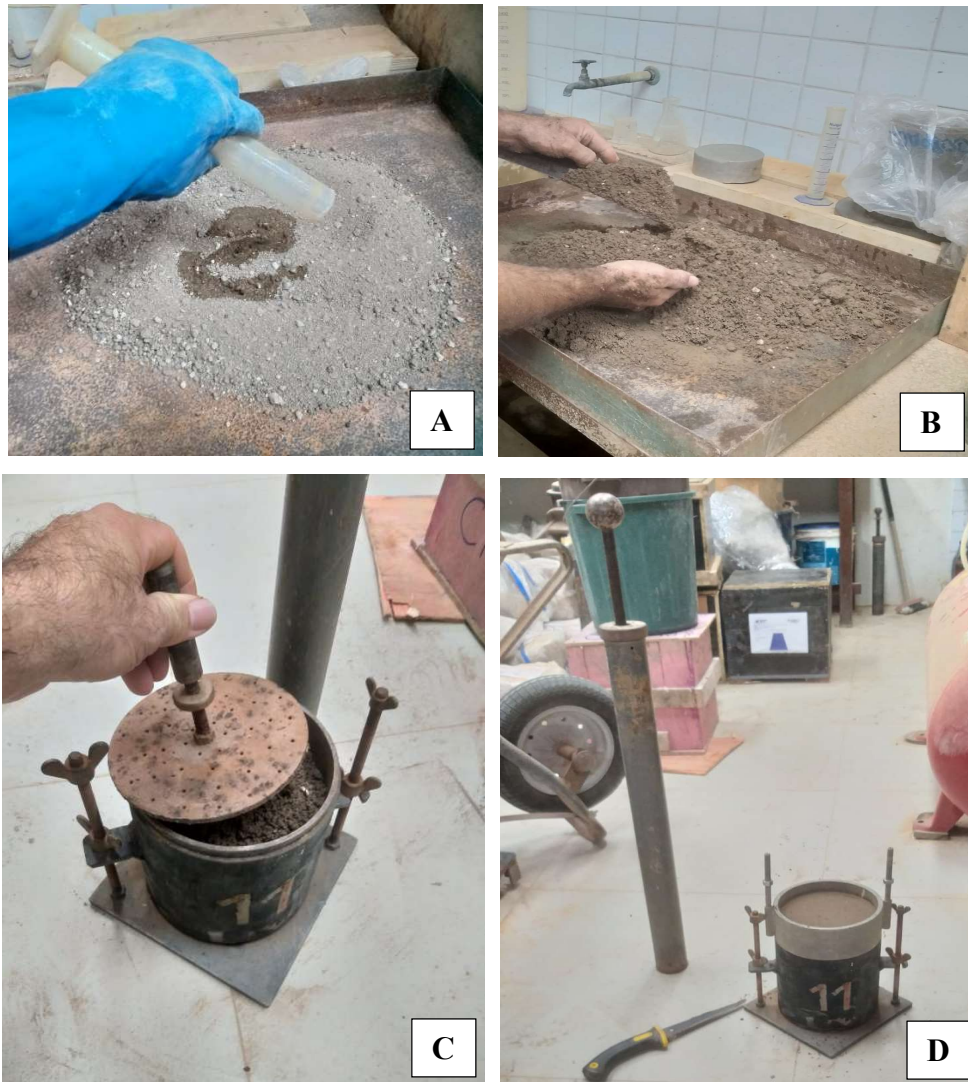
Fonte: Autor

### 3.3.4 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC)

A determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC ou *CBR*) é realizada através do ensaio definido na ABNT NBR 9895 (2016). O ISC é um parâmetro de capacidade de suporte de cargas do solo e no ensaio realizado é possível, além do valor percentual do ISC, obter também o valor percentual de expansão do solo.

Para este estudo foi tomada a amostra de solo com a intenção de realizar o ensaio ISC e também outra amostra para o ensaio de compactação, que determinou a curva de compactação (utilizável para o ensaio ISC) com a umidade ótima e massa específica aparente seca. A Figura 27 refere-se ao ensaio de compactação, destacando inclusive o cilindro utilizado (Figura 27c).

**Figura 27 - Ensaio de compactação. Colocação gradativa da água (a), homogeneização do material (b), cilindro e disco espaçador (c), soquete e compactação (d)**



Fonte: Autor

No ensaio de compactação definido pela ABNT NBR 7182 (2020), é possível realizá-lo com 3 tipos de energias: normal, intermediária ou modificada. Para o ensaio no solo representativo da camada do subleito, utilizou-se a energia do proctor normal (12 golpes por camada, em cinco camadas), isto porque, a norma nacional ABNT NBR 16416 (2015) não faz especificações, mas a norma americana ACI 522 R (2010) recomenda que, na execução de pavimentos permeáveis, a compactação do subleito deve ser obtida através da energia de compactação do proctor normal, porque, desta forma, o solo pode resistir aos esforços mecânicos que será submetido, mas também vai manter um percentual de vazios que permita a passagem da água por sua estrutura.

Almeida (2017) destaca ainda que o processo de compactação do solo diminui seu volume de vazios aumentando a sua resistência mecânica e estabilidade, mas também o torna menos

permeável e com menor capacidade de absorção de água, o que não é adequado para a pavimentação permeável. Com isso, justifica-se a escolha pela energia de compactação do proctor normal para este estudo.

Realizado o ensaio de compactação preliminar, o ensaio de ISC foi desenvolvido para determinação da expansão e penetração (índice ISC propriamente dito). Para tal, o corpo de prova é submergido em água durante 4 dias para leituras diárias do relógio comparador (deflectômetro) e indicação da expansão. Para a determinação do índice ISC, o corpo de prova é retirado da água e submetido a penetração em um prensa, onde avaliam-se as leituras no deflectômetro para intervalos de tempo e penetração predefinidos, resultando em valores de pressão para a determinação do índice ISC. O ensaio encontra-se ilustrado na Figura 28.

**Figura 28 – Ensaio ISC (CBR). Preparação do corpo de prova (a), colocação em tanque de submersão (b), penetração na prensa (c)**



### 3.3.5 Ensaio do coeficiente de permeabilidade do subleito

A definição do coeficiente de permeabilidade do subleito é obtida através da realização dos ensaios laboratoriais utilizando o permeâmetro à carga constante em solos estritamente granulares, ABNT NBR 13292 (1995), e para solos argilosos, utiliza-se o ensaio preconizado pela ABNT NBR 14545 (2000), com o permeâmetro à carga variável.

Novamente, o processo foi similar ao descrito nesta metodologia, onde a amostra ensaiada representa o solo da camada do subleito do pavimento permeável. Os resultados do coeficiente de permeabilidade do subleito são fundamentais para o dimensionamento hidráulico e o entendimento de como se comporta a permeabilidade da água através do subleito do pavimento permeável.

Como o solo foi definido através da distribuição granulométrica como granular, foi realizado o ensaio preconizado na ABNT NBR 13292 (1995), com o permeâmetro à carga constante. Neste ensaio, preenche-se o permeâmetro com o solo, satura-se este corpo de prova mantendo a carga hidráulica constante, e determina-se o tempo para determinado volume de água atravessar o permeâmetro saturado. Este ensaio está representado na Figura 29, e destaca-se que o cálculo do coeficiente de permeabilidade é função da lei de Darcy, apresentado na Equação 1.

$$K = \frac{V \times L}{A \times h \times t} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

K = Coeficiente de permeabilidade (cm/s);

V = Volume de água que atravessa a amostra (cm<sup>3</sup>);

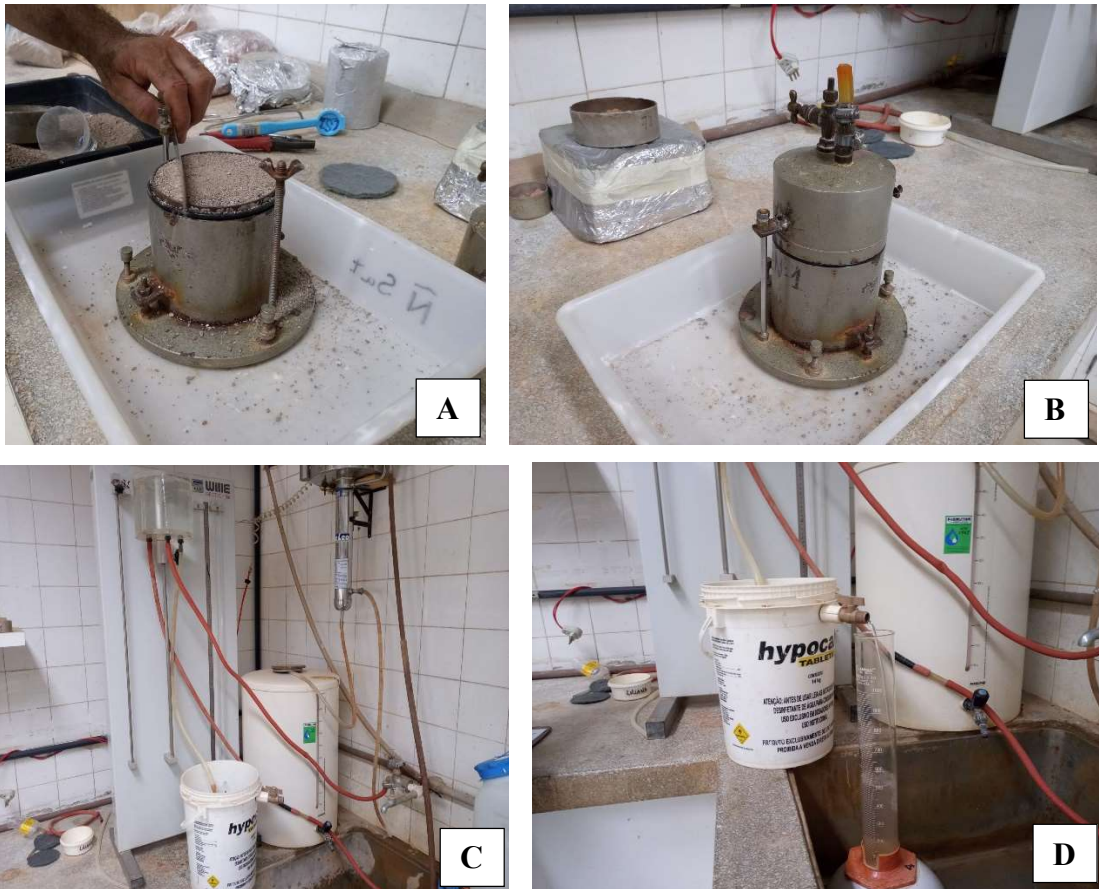
L = Espessura da camada de solo no permeâmetro, medida na direção do escoamento (cm);

A = Área da amostra de solo no permeâmetro (cm<sup>2</sup>);

h = Carga hidráulica (cm);

t = Intervalo de tempo (s).

**Figura 29 – Ensaio de permeabilidade à carga constante. Preparação do permeâmetro (a), permeâmetro (b), sistema de carga constante (c), coleta do volume com marcação do tempo (d)**



Fonte: Autor

### 3.3.6 Teste de permeabilidade do solo

Com a intenção de complementar os ensaios laboratoriais para determinação do coeficiente de permeabilidade do subleito, foram realizados ensaios em pontos distintos na profundidade de 45 cm (subleito), em campo, para a partir da infiltração acumulada, obtida com a utilização do infiltrômetro de anel simples, determinar a curva de infiltração do solo.

A metodologia utilizada é proposta com a colocação de volumes constantes de água de 70 ml a 250 ml (dependendo do tipo de solo no local) no infiltrômetro de anel simples continuamente. Cronometra-se o tempo necessário para a infiltração de cada volume, iniciando imediatamente após a entrada do primeiro volume de água no anel simples. Esse procedimento é repetido até que os intervalos de tempo de infiltração da água entre as medidas se tornem constantes e o ensaio seja finalizado.



O infiltrômetro de anel simples utilizado no ensaio é metálico, possuindo 15 cm de diâmetro e 10 cm de altura (Figura 30a), e deve ser cravado no início do ensaio a 1 cm de profundidade no solo, com o objetivo de se evitar perdas laterais de água durante o processo de infiltração. Para a realização do teste, além do infiltrômetro de anel simples, ainda são necessários: balde com água; recipientes ou copos plásticos para separação dos diversos volumes constantes a serem vertidos; marreta para colocação do infiltrômetro; nível bolha para garantia do seu nivelamento; e cronômetro para medição dos intervalos de tempo.

**Figura 30 – Ensaio de permeabilidade em campo. Infiltrômetro (a), nivelamento e copos com os volumes a serem vertidos na realização do ensaio (b)**



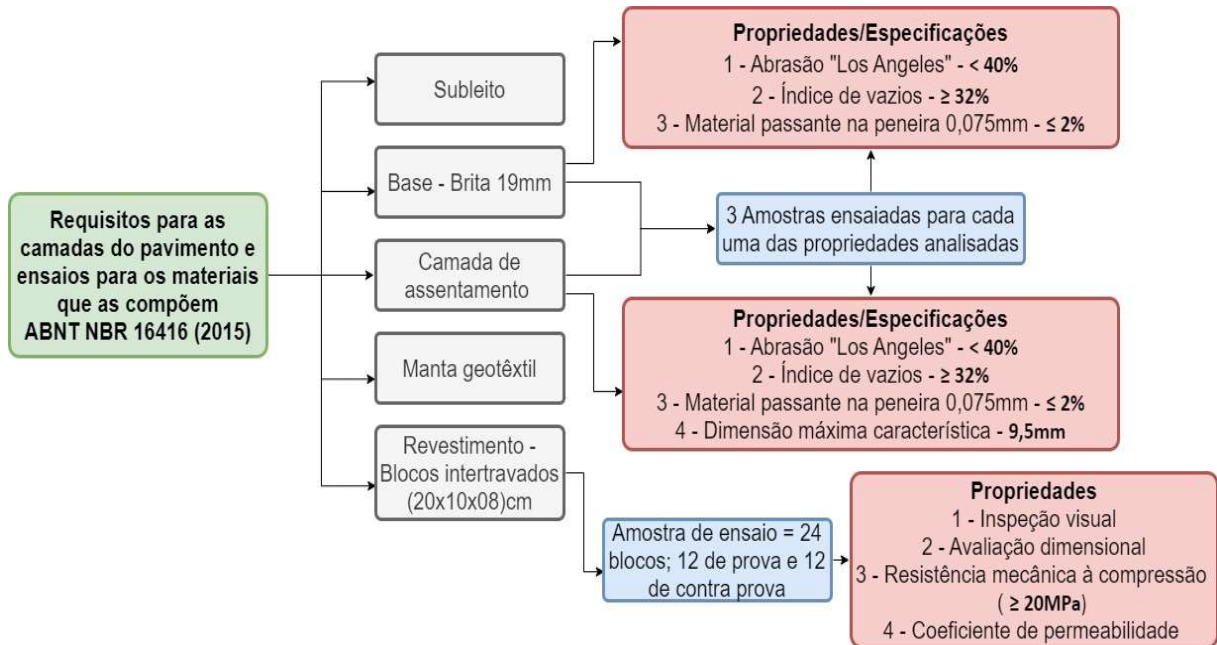
Fonte: Autor

### 3.4 Caracterização e requisitos dos materiais que compõem as camadas do pavimento

Para caracterizar as camadas do pavimento permeável experimental foi adotado o que preconiza a ABNT NBR 16416 (2015), sabendo da importância de analisar os critérios da norma nacional e se os parâmetros definidos por ela produzem um resultado satisfatório. Com este objetivo, em cada camada componente, foi verificada a aceitabilidade dos materiais utilizados considerando os critérios e valores normativos. A Figura 31 apresenta um fluxograma representativo das etapas de caracterização com os requisitos normativos das camadas componente do pavimento.

Destaca-se que para o subleito de suporte do pavimento, a norma nacional determina que se avalie a capacidade de suporte mecânico do solo, através do Índice de Suporte Califórnia (ISC) e o coeficiente de permeabilidade, ambos definidos na caracterização do solo.

**Figura 31 – Fluxograma da caracterização e requisitos das camadas do pavimento**



Fonte: Autor

### 3.4.1 Base

A camada de base do pavimento permeável é a principal responsável pela acumulação de água através do preenchimento dos vazios do material graúdo por ela, por isso, esta camada também é denominada de reservatório do pavimento permeável (Hammes, 2022). A camada de base deve ser constituída de materiais pétreos de granulometria aberta e devem atender aos requisitos normatizados, apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Especificações para o material de base**

Propriedade	Método	Especificação
Abrasão "Los Angeles"	ABNT NBR NM 51	< 40%
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32%
Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075mm	ABNT NBR NM 46	≤ 2%

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

Para a avaliação das especificações indicadas, a depender de cada propriedade, foram executados os métodos previstos na Tabela 1, com a realização de cada um dos ensaios normatizados. Em todos, 3 amostras do material utilizado para a base (brita 19 mm) foram ensaiadas para cada propriedade, respeitando também a indicação da ABNT NM 26 (2001) referente a amostragem de agregados. Enfatiza-se que esse procedimento adotado para o

material da base foi reproduzido para o material de assentamento, com as respectivas especificações normativas.

Além do que indica a ABNT NM 26 (2001), foi obedecido também o que determina a ABNT NM 27 (2001) sobre a realização de redução da amostra de campo para ensaios de laboratório, a partir de alguns métodos. Para este estudo, utilizou-se o método do quarteamento, onde para uma amostra da base (Figura 32a), utilizando o quarteador mecânico (Figura 32b), reduziu-se o material até as amostras necessárias específicas de cada ensaio, como o exemplo da Figura 32c, com as 3 amostras para o ensaio de material passante na peneira 0,075mm.

**Figura 32 – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório: amostra do material da base (a), quarteador mecânico (b), amostras reduzidas (c)**



Fonte: Autor

A Figura 33 apresenta um resumo em imagens da execução dos ensaios indicados na Tabela 1 e também da distribuição granulométrica realizada (Figura 33a com a amostra dentro do conjunto de peneiras no peneirador eletromagnético e Figura 33b com a separação

granulométrica obtida). A Figura 33c representa a máquina utilizada para o ensaio de abrasão “Los Angeles” e a Figura 33d o conjunto da amostra com as esferas abrasivas dentro do tambor. O ensaio do material passante na peneira 0,075mm é indicado na Figura 33e, apresentando inclusive na Figura 33f, a condição para finalizar a lavagem da amostra que é a saída da água destilada limpa em comparação a primeira lavagem. A Figura 33g mostra a submersão das amostras para realização do ensaio de massa específica (ABNT NBR NM53), pré-requisito para o índice de vazios. A secagem pós submersão de 24h (Figura 33h) e a colocação no cesto em submersão para pesagem (Figura 33i) compõem etapas da determinação da massa específica. Por fim, a Figura 33j representa o preenchimento do recipiente para posterior pesagem e determinação do índice de vazios.

**Figura 33 - Ensaio realizados para a camada de base.**



**Figura 33 - Ensaio realizados para a camada de base (cont.)**



Fonte: Autor

### 3.4.2 Manta geotêxtil

No pavimento experimental estudado foram colocadas duas camadas de manta geotêxtil, com a intenção de evitar ou reduzir ao máximo o processo de colmatção devido ao carreamento de finos. A manta geotêxtil a ser utilizada é do tipo não tecido agulhado, de filamentos contínuos fabricado em 100% poliéster, com resistência à tração de 14 kN/m, possuindo uma função de filtragem e separação dos materiais das camadas, além do importante objetivo relativo à colmatção, como citado.

A escolha das duas camadas de manta geotêxtil localizadas nas interfaces: camada de assentamento com a base e base com o subleito, foi devido ao fato de evitar tanto a penetração de finos provenientes do solo do subleito na camada de base, como também evitar a entrada de finos provenientes das camadas superiores na camada de base, sendo esses finos advindos do próprio uso do pavimento. Salienta-se que a proteção, tanto inferior, quanto superior, é justamente na camada de base, devido ao fato de ela ser a camada reservatório, onde se acumula a água do sistema permeável.

### 3.4.3 Camada de assentamento

A camada de assentamento faz-se necessária devido ao uso do revestimento intertravado permeável no pavimento e consiste em uma camada uniforme e constante de espessura, podendo possuir entre 20 mm e 60 mm na condição não compactada, conforme a ABNT NBR 16416 (2015). Deve ser constituída de materiais pétreos de granulometria aberta e que atendam aos requisitos apresentados na Tabela 2. Ressalta-se a escolha de 50 mm para espessura da camada de assentamento do pavimento permeável da POLI e que esta camada não é compactada na execução, devendo ocorrer a compactação em conjunto com o revestimento.

**Tabela 2 - Especificações para o material de assentamento**

<b>Propriedade</b>	<b>Método</b>	<b>Especificação</b>
Abrasão "Los Angeles"	ABNT NBR NM 51	< 40%
Índice de vazios	ABNT NBR NM 45	≥ 32%
Material passante na peneira com abertura de malha de 0,075mm	ABNT NBR NM 46	≤ 2%
Dimensão máxima característica	ABNT NBR 7212	9,5 mm

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

Para o material utilizado no assentamento, 3 amostras foram ensaiadas para cada propriedade destacada na Tabela 2, objetivando avaliar as especificações indicadas e também a distribuição granulométrica, conforme a ABNT NBR 16416 (2015). A Figura 34 apresenta o resumo ilustrativo da realização dos ensaios indicados na Tabela 2, acrescidos da granulometria. Destaca-se a ausência do ensaio de abrasão “Los Angeles” devido ao fato do material utilizado para o assentamento não possuir características mínimas de agregado graúdo para a realização do ensaio.

A Figura 34a ilustra o resultado da granulometria realizada com o procedimento similar ao material da base, com um conjunto de peneiras e o peneirador eletromagnético. A Figura 34b representa o ensaio do material passante na peneira 0,075mm. Para determinação da massa específica, necessária para a determinação do índice de vazios, foi realizado o ensaio preconizado na ABNT NBR NM 52 (2003). A Figura 34c indica a submersão das amostras em água, em seguida, a Figura 34d apresenta o teste do molde tronco cônico que indica a condição da umidade aparente necessária ao ensaio e a Figura 34e é a colocação da amostra com água em banho maria, registrando a temperatura para posterior retirada, colocação em estufa e pesagem. A última, a Figura 34f, ilustra o recipiente utilizado para determinação do índice de vazios completamente cheio e rasado com o material do assentamento, antes da sua pesagem.

**Figura 34 - Ensaio realizados para a camada de assentamento**



Fonte: Autor

#### 3.4.4 Caracterização do revestimento

O revestimento utilizado no pavimento experimental dessa pesquisa é o intertravado permeável, com as peças de concreto em formato de blocos permeáveis, tipo pavers, com 20 cm de comprimento, 10 cm de largura e 8 cm de espessura. Os blocos utilizados foram comerciais, adquiridos para execução da obra. A espessura mínima necessária para este tipo de revestimento é definida pela ABNT NBR 16416 (2015) como sendo 60 mm para o uso de tráfego de pedestre, no entanto, o bloco comprado foi o de 80 mm, mínimo necessário para o tráfego leve.

A ABNT NBR 16416 (2015) indica a realização de verificações necessárias para o atendimento das especificações mínimas das seguintes propriedades: avaliação dimensional (Figura 35a) e inspeção visual (Figura 35b), resistência à compressão (Figura 35c) e coeficiente de permeabilidade (Figura 35d). Para isso, a norma explicita as amostras mínimas necessárias para a realização dos ensaios, apresentadas na Tabela 3. No entanto, foram selecionadas 24 amostras para os ensaios, ao invés de 12. Enfatiza-se a informação normativa de que os corpos de prova devem ser e, de fato foram, coletados de forma aleatória, de modo a representar o todo do lote pavimentado, sendo todos identificados de forma indelével.

Destaca-se que, o ensaio de resistência mecânica à compressão (Figura 35c) foi realizado com a prensa EMIC, cujo modelo é o DL30000. Esta prensa fica localizada no laboratório avançado de construção civil da POLI-UPE e pode ser utilizada para ensaios de resistência à compressão, com limite máximo de 30 Mpa.

**Figura 35 – Ensaios nos blocos de concreto permeável. Avaliação dimensional (a), inspeção visual (b), resistência à compressão (c), coeficiente de permeabilidade (d)**



Fonte: Autor



**Tabela 3 - Amostragem mínima para os ensaios no revestimento**

Tipo de revestimento	Propriedade	Amostra mínima para lote de até 2500 m <sup>2</sup> de pavimento	
		Prova	Contra prova
Peças ou placas de concreto	Inspeção visual das peças ou placas	6	6
	Avaliação dimensional das peças ou placas	6	6
	Resistência mecânica das peças ou placas	6	6
Todos	Coefficiente de permeabilidade	3	3

Fonte: ABNT NBR 16416 (2015)

A referência normativa de que as mesmas peças (blocos) podem ser utilizados para a inspeção visual, avaliação dimensional e determinação da resistência mecânica, foi seguida. O lote especificado para o coeficiente de permeabilidade seguiu o que indica o ensaio próprio preconizado pela referida norma no seu anexo A (3 pontos para áreas de até 2500 m<sup>2</sup>) com a utilização do anel de infiltração. Ressalta-se que o coeficiente de permeabilidade pode ser previamente avaliado em laboratório só com as peças de revestimento ou em conjunto com toda a estrutura do pavimento.

A Tabela 4 foi elaborada através dos dados e tabelas da norma dos pavimentos permeáveis e indica, para cada propriedade, o respectivo método de ensaio e sua especificação necessária.

**Tabela 4 - Especificações para o revestimento em peças de concreto permeável e uso de tráfego de pedestres**

Propriedade	Método	Especificação
Inspeção visual	ABNT NBR 9781	Aspecto homogêneo, arestas regulares e ângulos retos, livres de rebarbas, defeitos, delaminação ou descamação do concreto
Avaliação dimensional	ABNT NBR 9781	Espessura mínima de 60mm Tolerância dimensional de $\pm 3$ mm para comprimento, largura e espessura
Resistência mecânica à compressão simples	ABNT NBR 9781	$\geq 20$ MPa
Coefficiente de permeabilidade (k)	ABNT NBR 16416 (Anexo A)	$> 10^{-3}$ m/s

Fonte: Autor. Dados: ABNT NBR 16416 (2015)

Vale destacar, em relação ao coeficiente de permeabilidade do revestimento, que esta propriedade precisa atingir o valor acima de  $10^{-3}$  m/s para o pavimento recém construído. Ou seja, caso o revestimento seja avaliado separadamente, deve atingir esse valor, mas a aprovação final da permeabilidade do pavimento permeável deve ser realizada em campo, após a execução total do pavimento, motivo este que justificou a escolha nesta pesquisa de avaliação do coeficiente de permeabilidade em conjunto com toda a estrutura do pavimento.

### 3.5 Dimensionamento do pavimento permeável

Para o dimensionamento de um sistema de pavimentação permeável são necessárias avaliações tanto dos esforços mecânicos e capacidade de suporte de cargas para o dimensionamento mecânico (como em qualquer sistema de pavimentação), quanto também dos dados hidráulicos e hidrológicos para o dimensionamento hidráulico, objetivando que o sistema seja de fato permeável, e através do seu volume de armazenamento hidráulico, contribua como uma técnica compensatória de infiltração para a redução das inundações urbanas.

#### 3.5.1 Chuva de projeto

Para realizar o dimensionamento hidráulico, definir a chuva de projeto é um dos parâmetros essenciais. Esta determinação deve seguir o que propõe o dimensionamento de um sistema de microdrenagem. Por isso, são usadas curvas ou equações IDF (intensidade/duração/frequência) para obtenção de valores de precipitação com intervalos de tempo inferiores a duração total da chuva (ABNT NBR 16146, 2015).

Na área de estudo, a equação IDF de chuvas intensas mais recente é a definida no plano diretor de drenagem e manejo de águas pluviais da cidade do Recife (RECIFE, 2015). Para a sua elaboração combinam-se dados de intensidade, duração e frequência das precipitações obtidas através de estudo estatístico de dados pluviográficos em uma série histórica. A Equação 2, representa a curva IDF para Recife.

$$i = \frac{611,3425 * Tr^{0,1671}}{(t+7,3069)^{0,6348}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

i: Intensidade de precipitação (em mm/h);

Tr: Tempo de retorno (em anos);

t: Duração da precipitação (em minutos).

Segundo a ABNT NBR 16416 (2015), deve ser adotado um tempo de retorno mínimo de 10 anos, considerando uma precipitação com duração mínima de 1 h. Adotando esses valores, a intensidade de precipitação resultante da aplicação da Equação 2, é a chuva de projeto.

No entanto, além desse valor de chuva de projeto, conforme a norma, realizou-se também uma análise com os dados da APAC e do CEMADEN com a intenção de encontrar uma chuva de projeto representativa para um intervalo de análise de 10 anos, entre Janeiro de 2013 e Dezembro de 2022, avaliando todas as chuvas diárias desse intervalo, com os dados da APAC (2023). A partir da maior chuva diária, avaliou-se a distribuição horária da precipitação ao longo do dia da maior chuva, com os dados do CEMADEN (2023). Com isso, foi possível uma comparação e análise entre os valores das chuvas de projeto definida pela norma de pavimentos permeáveis e os da chuva, considerando dados reais para a região de Recife.

### 3.5.2 Dimensionamento hidráulico

O dimensionamento hidráulico do sistema de pavimentação permeável busca calcular a espessura da camada de base, através da Equação 3, que apresenta apenas uma simplificação descritiva dos termos que constam na norma de pavimentação permeável, sem alterar o resultado calculado da equação normatizada. Esta tem sua conceituação teórica baseada no balanço de entradas de água no pavimento (via precipitação) e saída de água do pavimento (via infiltração no solo).

$$H_b = \frac{(P \cdot R + P) - f \cdot T_e}{V_r} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

H<sub>b</sub>: Espessura total da camada de base (reservatório) (m);

P: Precipitação de projeto (m);

R: Relação entre a área de contribuição e a área do pavimento permeável (A<sub>c</sub>/A<sub>p</sub>);

f: Taxa de infiltração do solo (m/h);

T<sub>e</sub>: Tempo efetivo de enchimento do reservatório (h);

V<sub>r</sub>: Índice de vazios da camada.

A respeito dos dados de entrada para o cálculo da espessura total da camada de base, a chuva de projeto é definida conforme indicado nesta metodologia, bem como os ensaios na base e no

subleito que resultarão respectivamente no índice de vazios da camada e na taxa de infiltração do solo. Para o tempo efetivo de enchimento do reservatório, adota-se o tempo efetivo indicado pela ABNT NBR 16416 (2015), igual a 2 h.

Para o valor de R, é necessário realizar uma relação entre a área de contribuição, ou seja, a área impermeável nas adjacências do pavimento permeável a ser executado que irão contribuir com escoamento superficial direto para incrementar a entrada de água no pavimento, e a área em si do pavimento permeável. Destaca-se o limite normativo para o valor de R, de 5, ou seja, a área de contribuição só pode ser até, no máximo, cinco vezes maior que a área do pavimento permeável.

### 3.5.3 Análise do tráfego e dimensionamento mecânico

Para realizar o dimensionamento mecânico do pavimento permeável, devem ser utilizados métodos reconhecidos para cada tipo de revestimento, ou seja, este tipo de dimensionamento é realizado por métodos da pavimentação convencional (ABNT NBR 16416, 2015).

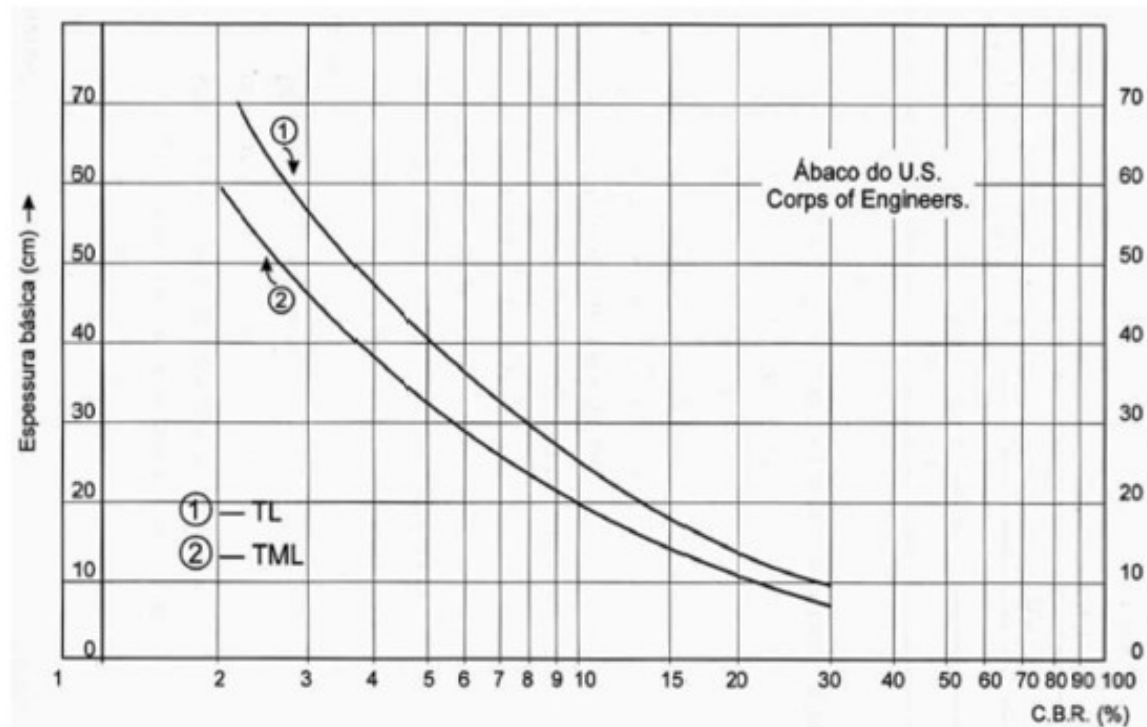
Existem diversos métodos de dimensionamento. Senço (2007), no manual de técnicas de pavimentação, destaca os seguintes: o do DNER, o da AASHTO, o Francês, o Shell, além do método da prefeitura municipal de São Paulo. Todos eles têm suas especificidades, mas têm em comum a consideração do tráfego ao qual o pavimento será submetido e a capacidade de suporte do subleito, dado pelo índice de suporte califórnia (ISC ou CBR).

O valor do índice suporte califórnia do subleito foi definido através do ensaio destacado nessa metodologia. Para avaliação do tráfego ao qual o pavimento é submetido, considera-se o uso do pavimento permeável, que será para pedestres, ou seja, um tráfego considerado bastante leve para todos esses métodos, tendo em vista que eles calculam todos os tipos de pavimentação. A ABCP (2021), em seu curso de projeto, especificação e uso de pavimentação permeável, destaca que para o uso de pedestres, mesmo com um valor baixo de ISC saturado, igual a 4%, a base pode apresentar um valor de 15 cm de espessura para satisfazer o dimensionamento mecânico.

No entanto, buscou-se avaliar o dimensionamento mecânico a partir do método da prefeitura municipal de São Paulo, que apresenta um ábaco e tabulações diretas para os pavimentos com tráfego muito leve (TML) e tráfego leve, conforme a Figura 36. Ressaltando que o método pressupõe como tráfego muito leve o de ruas residenciais, onde o máximo de veículos

comerciais deve ser 3 por dia, e o número típico de solicitações do eixo simples é apenas  $10^4$ , sendo o mais leve possível dos dimensionamentos.

**Figura 36 – Dimensionamento - Método da prefeitura municipal de São Paulo**



C.B.R. (%)	Espessura básica (cm)	
	TML	TL
2	60,0	70,0
3	46,0	56,5
4	38,5	48,0
5	33,5	41,5
6	29,5	36,5
7	27,0	33,0

C.B.R. (%)	Espessura básica (cm)	
	TML	TL
8	24,0	29,5
9	22,0	27,0
10	20,0	25,0
12	17,0	21,5
15	14,5	18,0
20	11,0	14,0
30	8,0	10,0

Fonte: Senço (2007)

Destaca-se que o dimensionamento mecânico da camada de base, conforme a Figura 36, mesmo sendo o mais leve possível (TML), ainda pode ser considerado superior ao que o pavimento permeável para uso de pedestres será, de fato, solicitado a partir do requisito de suporte de cargas.

### 3.5.4 Dimensionamento final

O dimensionamento final do pavimento permeável, isto é, a definição da espessura da camada da base (reservatório), é o resultado do maior valor entre os dimensionamentos mecânico e hidráulico. A norma de pavimentação permeável ABNT NBR 16416 (2015, p.9) expressa essa definição:

“O projeto de um pavimento permeável deve considerar o tipo de uso e o local de implantação, sendo que a definição dos materiais e espessuras das camadas a serem executadas deve atender concomitantemente aos dimensionamentos mecânico e hidráulico.”

### 3.6 Monitoramento dos níveis de água na área e no pavimento permeável

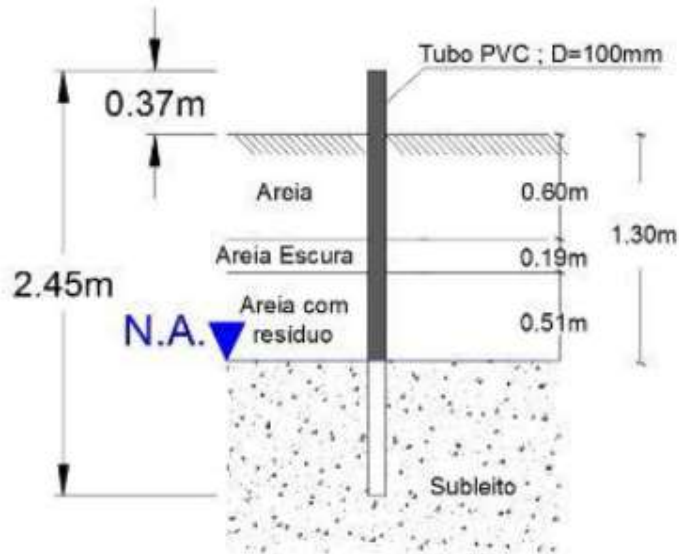
Com o intuito de realizar a avaliação do comportamento hidráulico do pavimento, para discutir o seu papel no amortecimento do escoamento superficial direto como uma alternativa compensatória de infiltração para a redução de alagamentos urbanos, um dos monitoramentos contínuos realizados foram os níveis de água na área do entorno e no próprio pavimento experimental.

Este monitoramento é importante para avaliar como comportam-se as variações no lençol freático local e as infiltrações de água no solo advindas do sistema drenante e, conseqüentemente, a sua influência no lençol freático.

Para realizar o monitoramento na área do entorno ao pavimento permeável experimental aproveitaram-se 3 piezômetros instalados na área. Um deles, denominado neste estudo de piezômetro PZ1 foi instalado por Barros (2021), em agosto de 2020, e é um tubo de PVC com 100 mm de diâmetro, cravado no solo, conforme ilustra a Figura 37, e possuía nível do lençol freático na data de instalação de 1,30 m. Os outros piezômetros, denominados PZ2 e PZ3 seguem o mesmo padrão apresentado para PZ1, ou seja, tubos de PVC com 100mm de diâmetro. A instalação de PZ2 e PZ3 foi realizada por Silva (2022).

Por definição, os piezômetros são tubos colocados no solo em contato com a atmosfera e na parte inferior aberto para o solo saturado. Eles têm o seu funcionamento baseado com a medição do potencial hidrostático e da pressão positiva que convertem-se em carga hidráulica, ou seja, a água sob pressão positiva abaixo do lençol freático entra no piezômetro e sobe até o nível da pressão hidrostática interna que é a mesma pressão da água no solo, fora do tubo (Barros, 2021).

**Figura 37 – Perfil do piezômetro PZ1**



Fonte: Barros (2021)

Para realização do monitoramento, através das medições dos níveis estáticos de posição da água dentro dos piezômetros, foi utilizado o equipamento de medição de nível d'água manual, da marca Brasbailer com dispositivo de contato elétrico, funcionando com bateria. A medição é dada através da graduação métrica do cabo do medidor (na cor amarela), que possui extensão de 50 m e precisão de 1 mm, tomada a medida zero na ponta do sensor. A Figura 38a mostra o equipamento utilizado e a Figura 38b um recorte indicando o sensor pontiagudo.

**Figura 38 – Equipamento manual de medição de nível d'água (a), indicação do sensor (b)**



Fonte: Autor

Quando o sensor entra em contato com a água emite um alerta sonoro indicando o nível d'água, e então a leitura deve ser realizada. Destaca-se que o equipamento de medição manual possui também um peso articulado de aço inox rosqueado na parte inferior do sensor para auxiliar na descida dentro do piezômetro e para proteger o sensor de choques mecânicos.

Além do monitoramento no entorno do pavimento experimental através dos piezômetros PZ1, PZ2 e PZ3, foram instalados outros 4, distribuídos diretamente na área do módulo experimental de 27m<sup>2</sup> que compõe a área total executada na obra de reforma da POLI. Através destes 4 novos piezômetros perfurados ao longo de sua extensão (Figura 39), denominados PZN1, PZN2, PZN3 e PZN4 foi possível monitorar e avaliar as variações no lençol freático na área do próprio pavimento permeável de forma contínua.

**Figura 39 - Piezômetros instalados na área do módulo experimental**



Fonte: Autor

Em relação a posição dos piezômetros no campus universitário, PZ1 era praticamente no limite do terreno da POLI com a Rua Prof. Benedito Monteiro, bem próximo ao encontro com a Rua Benfica, mas após a reforma no campus que alterou parte do muro externo, agora encontra-se no passeio público. PZ2 e PZ3 se encontram por trás do bloco A do campus, onde após a reforma é a nova cantina e estão limítrofes entre o terreno da POLI e a edificação vizinha.

A Figura 40a indica a posição, em planta, dos piezômetros PZ2 e PZ3 instalados anteriormente, bem como a indicação dos piezômetros PZN01, PZN02, PZN03 e PZN04 instalados durante



este estudo. A Figura 40b mostra a posição do piezômetro PZ1, instalado anteriormente por Barros (2021). Destaca-se que a Figura 40b representa o recorte do projeto de reforma em andamento para a entrada principal do campus universitário.

**Figura 40 - Localização dos piezômetros. Área onde se encontra o módulo experimental e os piezômetros PZ02, PZ03, PZN01, PZN02, PZN03, PZN04 (a), recorte da área de entrada da POLI-UPE onde se localiza o piezômetro PZ01 (b)**



Fonte: Autor

### 3.7 Análise do desempenho hidráulico

Buscando avaliar o desempenho hidráulico, foram realizados os ensaios de permeabilidade do pavimento permeável, além das simulações hidráulicas em campo e das avaliações dos dados de precipitação local real e nível d'água associado à infiltração no pavimento.

#### 3.7.1 Ensaios de permeabilidade do pavimento

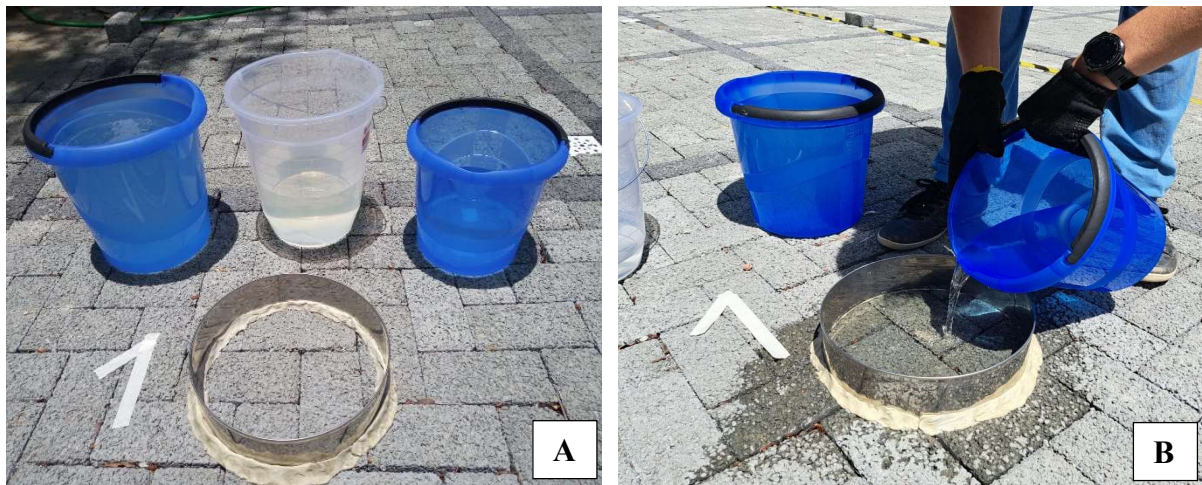
Uma das avaliações do desempenho hidráulico da infiltração é a determinação do coeficiente de permeabilidade do pavimento. Esta avaliação deve ser realizada, conforme a metodologia existente na ABNT NBR 16416 (2015), com a utilização do anel de infiltração em campo e é um parâmetro importante da eficiência de infiltração do pavimento permeável.

A ABNT NBR 16416 (2015) descreve a metodologia com utilização dos equipamentos: anel de infiltração, que consiste em um cilindro vazado de 300 mm de diâmetro e 50 mm de altura com demarcações internas de 10 mm e 15 mm da face inferior do anel; recipiente com volume de 20 L; cronômetro com resolução de 0,1 s; balança com resolução de 0,1 g; massa de calafetar; e água limpa. Sendo o lote de ensaio igual a 3 pontos diferentes (área até 2500 m<sup>2</sup>) e com a realização ocorrendo em um intervalo superior a 24 h da última precipitação ocorrida no local.

O procedimento indica o posicionamento do anel de infiltração e sua vedação na parte em contato com o pavimento com massa de calafetar. Para iniciar, é feita e cronometrada uma pré-molhagem com 3,6 L e o ensaio deve começar em até 2 min após esta pré-molhagem. O volume de água do ensaio deve ser 3,6 L, se o tempo da pré molhagem for superior a 30 s; em caso contrário, utiliza-se 18 L, despejando a água no anel de infiltração com velocidade suficiente para manter o nível da água entre as demarcações internas do anel de 10 mm e 15 mm. A Figura 41 apresenta o ensaio de permeabilidade do pavimento.

Deve ser cronometrado o intervalo de tempo, iniciando assim que a água tocar a superfície do pavimento, e finalizando quando não houver mais água livre na superfície. O tempo deve ser registrado com exatidão de 0,1 s. Como foi realizada uma repetição do ensaio no mesmo ponto, que é o permitido pela norma, a segunda determinação não necessitou de pré-molhagem pois o início foi, em todos os ensaios, até 5 min após o primeiro ensaio. Neste caso, foi considerado a média das duas determinações como resultado final do ensaio em cada ponto.

**Figura 41 – Determinação do coeficiente de permeabilidade do pavimento permeável. Volumes de água separados e anel de infiltração vedado com massa de calafetar (a), execução do ensaio(b)**



Fonte: Autor

Destaca-se que a norma foi respeitada tanto na vedação de repetição do ensaio (mais de duas vezes no mesmo local em um mesmo dia), quanto na realização do ensaio com a garantia de intervalo superior a 24h da última precipitação ocorrida no local. Esses ensaios foram repetidos em 3 dias diferentes e o resultado final do coeficiente de permeabilidade do pavimento recém construído levou em consideração todas as medições realizadas.

### 3.7.2 Realização de simulações hidráulicas em campo

Outra forma adotada para analisar o desempenho hidráulico da infiltração do pavimento, foi a realização de simulações hidráulicas em campo. A metodologia consiste em simular hidraulicamente uma lâmina superficial de precipitação, pois com uma quantidade de água definida, e sabendo a área de ensaio experimental, é possível determinar a altura da lâmina d'água que representa uma precipitação de mesma intensidade.

Para a realização das simulações foram utilizados 2 tanques-reservatórios com capacidade de 1.000 L (1 m<sup>3</sup>). Uma das simulações foi realizada em toda a área do módulo experimental de 27m<sup>2</sup> (2,7m x 10m), conforme apresenta a Figura 42a. A outra simulação foi realizada com os mesmos 2 m<sup>3</sup> de água, mas em uma área reduzida de 9,45m<sup>2</sup> (2,7m x 3,5m), buscando avaliar o comportamento do pavimento experimental a uma situação mais crítica (igual volume de água e área de ensaio menor), conforme apresenta a Figura 42b.

**Figura 42 – Área dos ensaios de simulação hidráulica. Área total do módulo experimental com 27m<sup>2</sup> (a), área reduzida com 9,45m<sup>2</sup> (b)**



Fonte: Autor

Nas simulações hidráulicas foi utilizado um medidor de nível d'água automático introduzido em um dos piezômetros instalados no pavimento experimental. Com isso, as leituras foram realizadas de forma automática e consecutiva dos níveis de água atingidos no piezômetro através do sensor, registrando os valores no aparelho de armazenamento de dados datalogger (Figura 43a).

O equipamento automático é da marca Ampeq e modelo DALO 105, capaz de captar, armazenar e disponibilizar as informações através de um conjunto composto por: datalogger (linógrafo alimentado por uma bateria de 9v); sensor (composição de mecanismos elétricos de alta precisão de medição, protegidos e localizados no extremidade de uma mangueira rígida); cabos de ligação entre o sensor e o datalogger (Figura 43b); e um software que permite o descarregamento dos dados diretamente em um computador.

**Figura 43 – Medidor de nível d'água automático. Datalogger (a), conjunto AMPEQ (b)**



Fonte: Autor – (A); Barros (2021) – (B)

Ressalta-se que este equipamento automático, introduzido em um dos piezômetro do pavimento experimental, permaneceu por um período de utilização maior que apenas o período das simulações hidráulicas realizadas. Isso ocorreu com a intenção de se obter dados contínuos para o monitoramento do nível d'água no pavimento, com medições automáticas a cada minuto.

### 3.7.3 Avaliações dos dados de precipitação e nível d'água

Concluindo-se a avaliação do desempenho hidráulico do pavimento permeável experimental, foram monitorados os índices pluviométricos reais através dos dados contínuos de precipitação obtidos da APAC (2023), buscando as precipitações intensas e também períodos de chuvas sucessivas.

Através desses dados foi possível avaliar as chuvas mais intensas durante o período de observação e realizar uma comparação direta com os dados de nível d'água no pavimento permeável, obtidos através das medições contínuas do sensor automático no período em que ficou instalado no piezômetro (24/02/2023 a 30/04/2023). Com isso, analisou-se comparativamente os dados para mais uma avaliação de desempenho hidráulico do pavimento, sendo esta análise uma boa relação entre precipitação e infiltração para eventos chuvosos naturais, além das análises destacadas dos eventos de simulação hidráulica e dos ensaios de permeabilidade do pavimento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

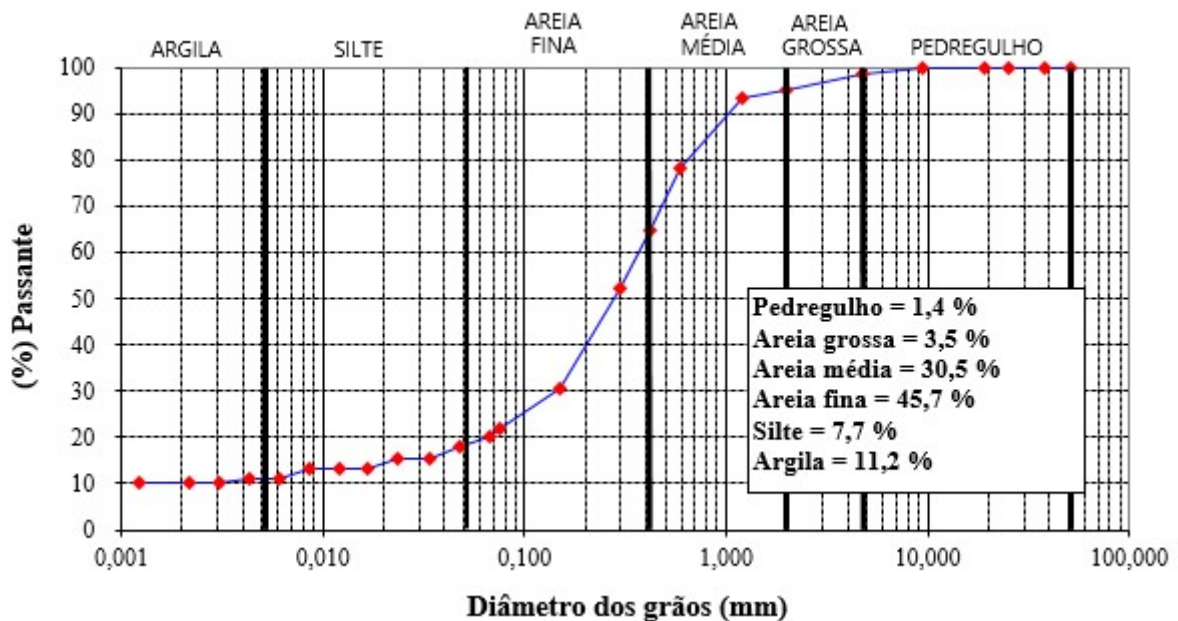
### 4.1 Caracterização do solo da área experimental

Foram realizados os ensaios de campo e de laboratório descritos na metodologia para análise do comportamento do solo que representa o subleito do pavimento permeável experimental. Os resultados dos ensaios estão apresentados e discutidos separadamente realizando-se também uma análise por completo do solo.

#### 4.1.1 Granulometria do solo

A curva granulométrica da amostra que representa o solo do subleito do pavimento permeável a uma profundidade de 45cm, é apresentada na Figura 44. É possível observar uma predominância da fração de areia que totaliza aproximadamente 80% da composição do solo. Quanto aos limites de consistência, o solo apresentou baixa plasticidade e foram classificados como não líquidos (NL) e não plásticos (NP).

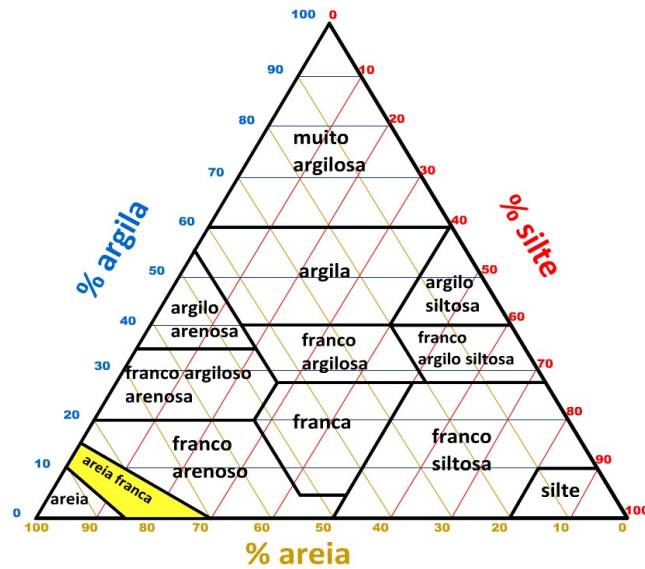
**Figura 44 - Curva granulométrica do solo do subleito**



Fonte: Autor

A amostra de solo foi classificada através do triângulo textural (Figura 45) como sendo uma areia franca, e devido ao seu baixo percentual de finos e baixa plasticidade, apresenta-se como um subleito de boa qualidade, quanto à sua composição, para a implantação de técnicas compensatórias de infiltração como o pavimento permeável.

Figura 45 - Classificação do solo - Triângulo textural

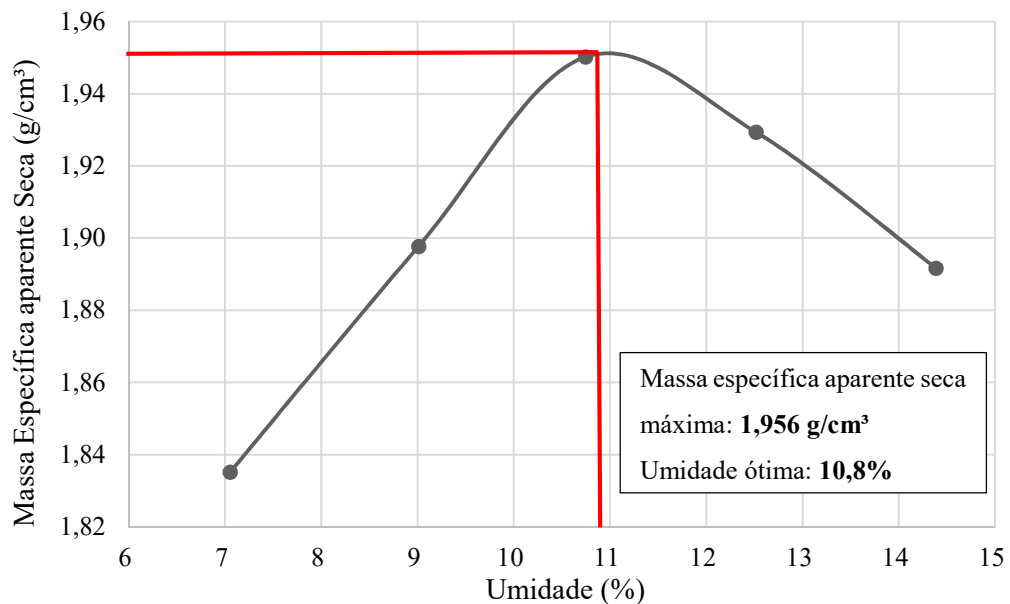


Fonte: Autor

#### 4.1.2 Ensaio de compactação

Para a realização do ensaio de compactação na amostra de solo do subleito, utilizou-se a energia do proctor normal (12 golpes por camada, em cinco camadas) e o resultado do ensaio indicou uma umidade ótima igual a 10,8% e a massa específica aparente seca máxima foi de 1,956 g/cm<sup>3</sup>. Esses valores e os 5 pontos ensaiados podem ser observados graficamente na curva de compactação (Figura 46).

Figura 46 - Curva de compactação – Energia de proctor normal



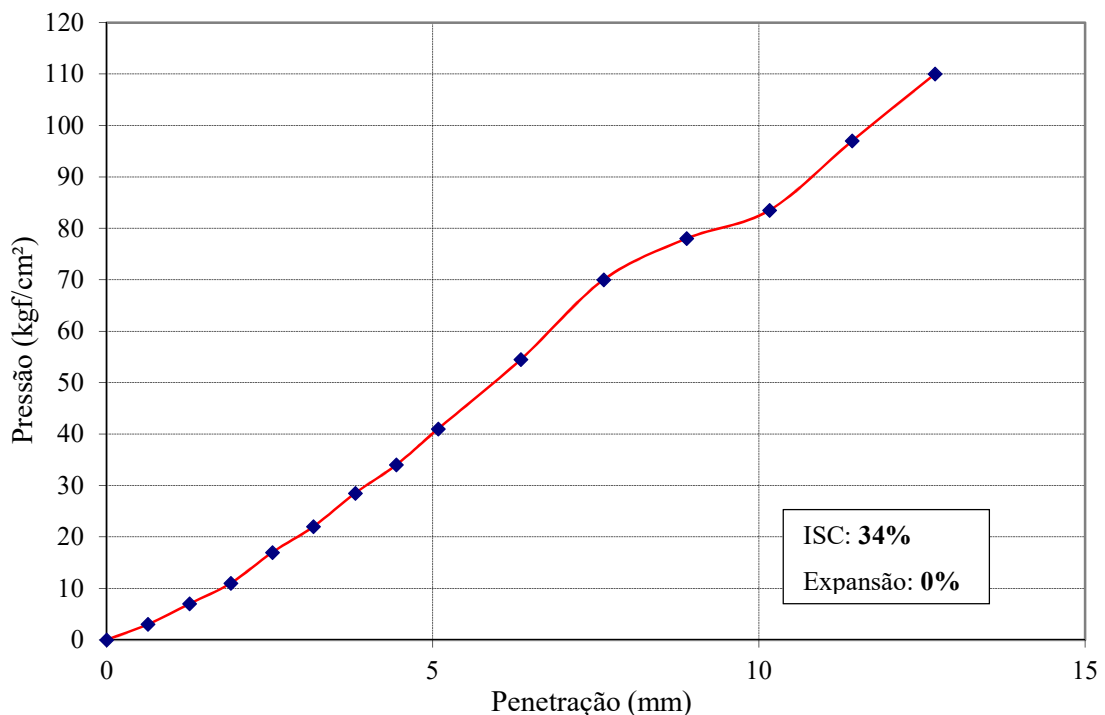
Fonte: Autor

Ressalta-se que a ABNT NBR 16416 (2015) não faz especificações quanto a energia de compactação a ser utilizada no ensaio, mas a norma americana ACI 522 R (2010) recomenda a compactação do subleito obtida através da energia de compactação do proctor normal, visando manter um maior percentual de vazios para permitir a percolação de água nesse solo mas também preservando a resistência aos esforços mecânicos.

#### 4.1.3 Índice de Suporte Califórnia (ISC)

O Índice de Suporte Califórnia é um importante ensaio para a pavimentação em geral. Quanto aos pavimentos permeáveis, o valor do ISC do subleito é a informação principal para o dimensionamento mecânico do pavimento. Destaca-se que o ISC é comumente denominado pelo seu termo em inglês, *California Bearing Ratio (CBR)*, mas nesta pesquisa o termo em português foi o padrão utilizado. A Figura 47 ilustra o gráfico do ensaio que relaciona pressão por penetração e a partir desses dados encontrou-se o valor do ISC igual a 34%. Outro parâmetro obtido na realização do ensaio foi a expansão, através das leituras em 4 dias consecutivos no deflectômetro colocado no corpo de prova durante a submersão no tanque de água. Este valor de expansão foi igual a 0%.

**Figura 47 – Ensaio ISC – Pressão X penetração**



Fonte: Autor



#### 4.1.4 Coeficiente de permeabilidade do subleito

A determinação do coeficiente de permeabilidade do subleito foi realizado conforme a metodologia do permeâmetro à carga constante por causa da característica granular do material, determinada na granulometria. Com isso, ao desenvolver o ensaio, é necessário encontrar os dados de entrada da equação para a obtenção do coeficiente de permeabilidade, considerando-se, na realização do ensaio, o grau de compactação do subleito, determinado *in loco* pelos estudos de Almeida (2017) e Silva (2022) para áreas adjacentes ao pavimento experimental como sendo igual a 90%.

Através dos valores obtidos de volume de água que atravessa a amostra, espessura da camada de solo no permeâmetro, área da amostra, carga hidráulica e intervalo de tempo, este último cronometrado 3 vezes seguidas para um mesmo volume e tomada a média como valor final, é possível substituir os valores na Equação 1, obtendo-se o resultado de  $6,38 \times 10^{-3}$  cm/s conforme apresenta a Equação 4.

$$K = \frac{1000 \times 11,59}{87,04 \times 90 \times 232} = 6,38 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \quad (\text{Equação 4})$$

Este valor do coeficiente de permeabilidade encontra-se em desacordo com a ABNT NBR 16416 (2015) adotando-se o sistema de infiltração total, como foi definido e executado, pois para tal, o valor normativo mínimo é  $10^{-3}$  m/s, ao passo que o valor encontrado no ensaio foi de  $6,38 \times 10^{-5}$  m/s. A norma nacional indica um coeficiente mínimo bem restritivo, no entanto, a norma americana ACI 522 R (2010) traz a necessidade de que o coeficiente mínimo de permeabilidade do solo para os sistemas de infiltração total seja superior a  $3,6 \times 10^{-6}$  m/s, desde que este solo se estenda até pelo menos 1,20 m da superfície.

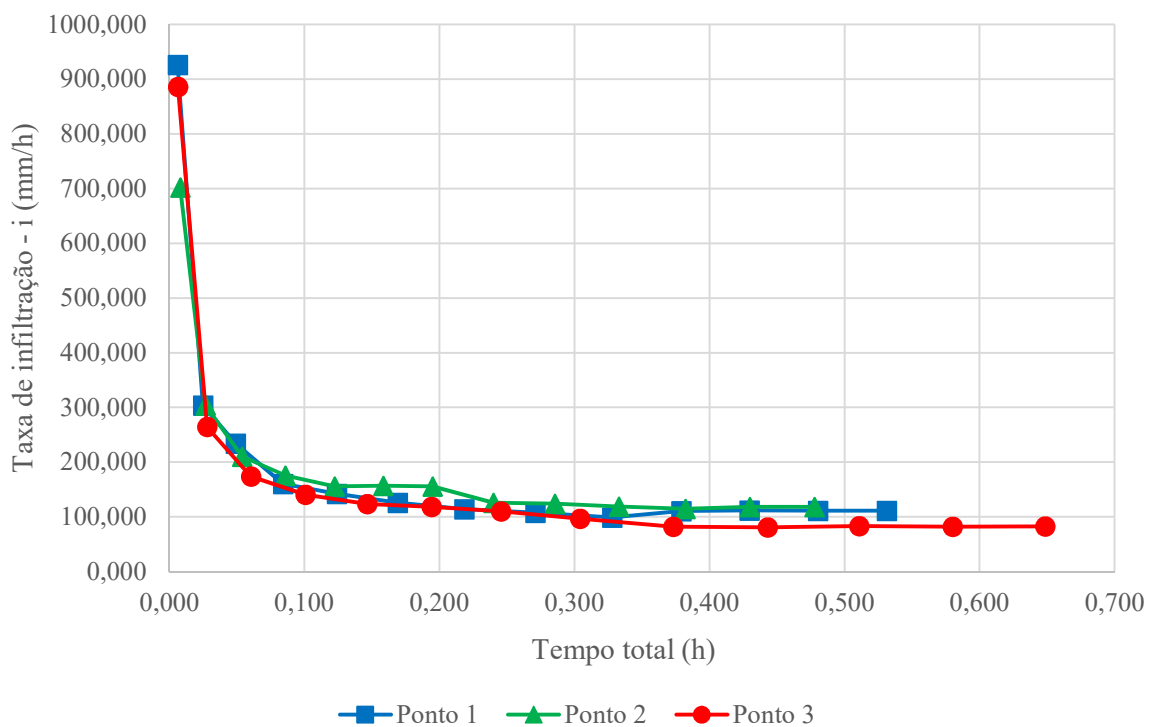
Devido a isto, buscando avaliar a adequação da escolha do sistema de infiltração total, foi realizado também o ensaio de permeabilidade à carga constante para uma amostra de solo na profundidade de 1,20m, também caracterizada como granular. O valor do coeficiente de permeabilidade (K) foi de  $8,76 \times 10^{-6}$  m/s, valor superior ao mínimo definido na norma americana, respaldando-se assim a escolha do sistema de infiltração total.

Realizando uma análise comparativa entre os coeficientes de permeabilidade para as profundidades de 0,45m e 1,20m, foi verificado que o valor de K é maior para a profundidade de 0,45m, diferença evidenciada, pois enquanto em uma amostra o enchimento de 1000ml foi no tempo médio de 3min e 52seg, a outra teve média de 11min e 16seg para 400ml.

#### 4.1.5 Teste de infiltração com anel simples

O teste de infiltração realizado em campo com o infiltrômetro de anel simples resultou em dados de infiltração acumulada e taxa de infiltração em um intervalo de tempo. Esse ensaio realizado em 3 pontos distintos, sem repetição, na área do subleito do pavimento experimental visou uma análise mais completa além do ensaio laboratorial de coeficiente de permeabilidade do solo. A Figura 48 mostra as curvas de infiltração, com as suas respectivas taxas para os 3 pontos ensaiados.

**Figura 48 - Curvas de infiltração - Solo do subleito**

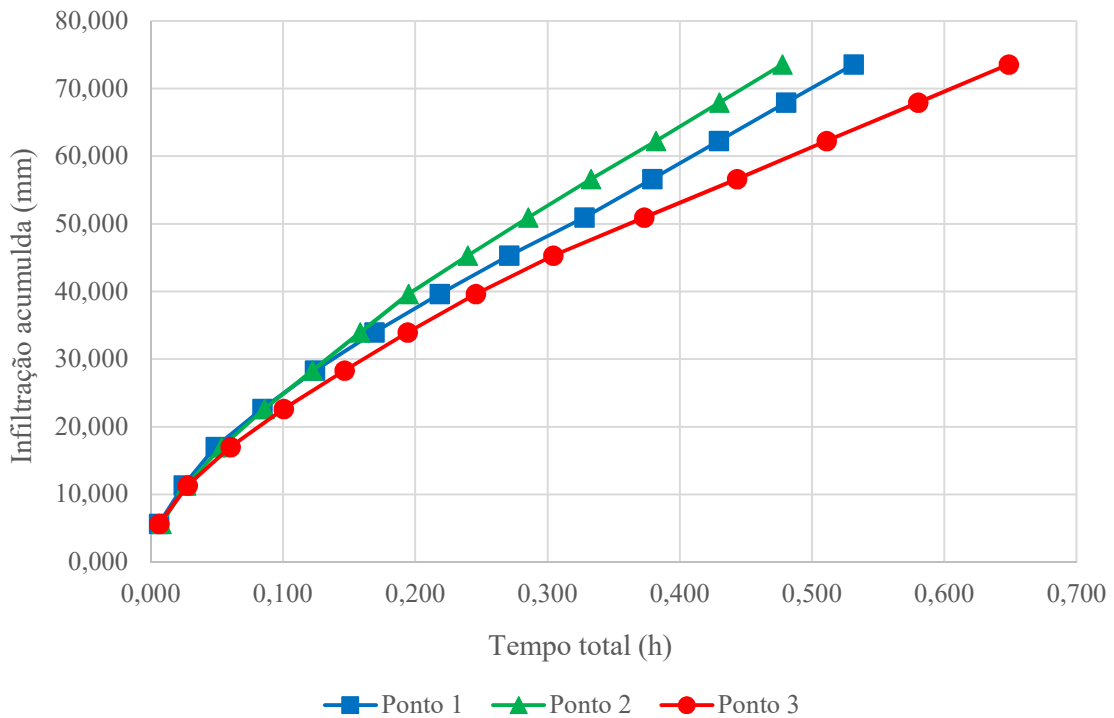


Fonte: Autor

No ponto 1, o valor máximo da taxa de infiltração é 925,99 mm/h e o mínimo que tende a constância: 111,2 mm/h. Para o ponto 2, os valores são: 702,48 mm/h e 118,44 mm/h; por fim, para o ponto 3: 885,73 mm/h e 82,48 mm/h. Esses valores, conforme a ABNT NBR 16416 (2015), são para um grau médio de permeabilidade do solo ( $>36\text{mm/h}$  e  $\leq 3600\text{mm/h}$ ).

A Figura 49 apresenta os valores de infiltração acumulada em relação ao tempo decorrido dos ensaios para cada um dos pontos ensaiados.

**Figura 49 - Infiltração acumulada X tempo**



Fonte: Autor

Em relação ao solo do subleito do pavimento permeável na profundidade de 45cm, após os ensaios realizados, é possível afirmar que ele tem boas condições para a implantação de técnicas compensatórias de infiltração, haja vista a caracterização como areia franca, a boa capacidade de suporte de cargas através do ISC igual a 34%, e uma condição de permeabilidade compatível com as necessidades de infiltração para o pavimento permeável.

## 4.2 Caracterização e análise dos materiais componentes do pavimento

A caracterização da brita 19mm que compõe a base do pavimento foi realizada através de ensaios no laboratório, bem como a caracterização do material utilizado para o assentamento e os blocos permeáveis do revestimento. Desenvolveu-se o que propõe a ABNT NBR 16416 (2015), norma brasileira dos pavimentos permeáveis de concreto, e realizaram-se as análises necessárias.

### 4.2.1 Camada de base

O material utilizado para formar a base do pavimento é comercializado como brita 19mm. Realizou-se inicialmente a análise granulométrica para 3 amostras selecionadas, encontrando uma média representativa da granulometria do material. Para isto, foi selecionado o conjunto

de peneiras para verificar a conformidade com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16416 (2015). O resultado dessa análise está indicado na Tabela 5.

**Tabela 5 - Análise granulométrica - Camada de base**

PENEIRA - ABERTURA DE MALHA	Camada de BASE				
	Nº do ensaio: Média das 3 amostras Massa Total Ensaçada: 3000g				
mm	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	Referência ABNT NBR 16416 (2015) (% retida acumulada)	Conformidade com a norma
37,5	0	0,0	0	0	SIM
25	0	0,0	0	0 a 5	SIM
19	4,62	0,2	0	0 a 35	SIM
12,5	1583,79	52,8	53	40 a 75	SIM
4,75	1387,27	46,3	99	90 a 100	SIM
2,36	4,55	0,2	99	95 a 100	SIM
Fundo	18,50	0,6	100		
<b>Total</b>	<b>2998,74</b>			<b>Dimensão Máxima Característica = 19mm</b>	
				Perda de material na execução - Erro = 0,042 %	

Fonte: Autor

Observa-se então que o material utilizado para constituir a camada de base do pavimento permeável possui uma distribuição granulométrica em conformidade com os intervalos propostos pela norma nacional ABNT NBR 16416 (2015).

Além desta avaliação, é uma necessidade normativa avaliar outras três propriedades para o material da base. Para todos os ensaios necessários, foi desenvolvido o padrão de realização com 3 amostras e tomado o resultado final como sendo a média entre eles. Para a abrasão “Los Angeles” os valores encontrados foram: 24,51 %; 27,92 % e 28 %, resultando no valor médio de 26,81 %.

Na análise da propriedade do material passante na peneira 0,075mm, os percentuais de material mais fino que 0,075mm e conseqüentemente passantes na peneira com esta abertura após a realização do procedimento do ensaio preconizado pela ABNT NM 46 (2003), foram: 0,461%; 0,430% e 0,815%, resultando no valor representativo de 0,569%.

Para a determinação do índice de vazios, foi necessária a realização prévia do ensaio que determina, dentre outras propriedades, a massa específica do agregado seco através da ABNT NM 53 (2003). Após a realização do ensaio, as 3 amostras apresentaram seus valores: 2,667g/cm<sup>3</sup>; 2,658 g/cm<sup>3</sup> e 2,661 g/cm<sup>3</sup> com a média entre eles de 2,662g/cm<sup>3</sup>. Com esse valor

e realizando o ensaio do índice de vazios foi possível determinar o índice das 3 amostras ensaiadas: 42,60%; 43,13% e 42,60%, determinando o índice de vazios igual a 42,77%.

A Tabela 6 apresenta o resumo dos resultados encontrados por propriedade ensaiada e a análise de conformidade com os valores especificados pela ABNT NBR 16416 (2015). Observa-se que o agregado utilizado para a composição da base do pavimento permeável experimental atende a todos os requisitos especificados pela norma.

**Tabela 6 - Resultados dos ensaios - Material da base do pavimento permeável**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado - Ensaios</b>	<b>Especificação normativa - ABNT NBR 16416 (2015)</b>	<b>Conformidade com a norma</b>
Abrasão "Los Angeles"	26,81%	< 40%	SIM
Material passante na peneira 0,075mm	0,57%	≤ 2%	SIM
Massa específica do agregado seco	2,662 g/cm <sup>3</sup>	-	-
Índice de vazios	42,77%	≥ 32%	SIM

Fonte: Autor

#### 4.2.2 Camada de assentamento

O material utilizado para executar a camada de assentamento com espessura de 5cm entre a base e o revestimento em blocos de concreto permeável foi um pó de brita. Este material é visualmente inadequado para a função que exerce, fato que foi relatado aos responsáveis da obra quando o material foi visto, mas sua troca não foi realizada e o material foi utilizado na execução de toda a área de pavimentação permeável, incluindo a área experimental estudada. A inadequação é observada no aspecto visual devido ao material ser mais fino do que deveria.

No entanto, como o material compôs o pavimento, esse estudo realizou toda a verificação de conformidade com os requisitos estabelecidos pela ABNT 16416 (2015) para análise correta do material. Para a distribuição granulométrica e também para os outros ensaios executados, o padrão seguido de realização foi com 3 amostras e a tomada do resultado final como sendo a média entre eles.

Para análise da granulometria do material, foi selecionado o conjunto de peneiras visando verificar a conformidade com o que define ABNT NBR 16416 (2015). O resultado do ensaio e da verificação estão indicados na Tabela 7.

**Tabela 7 – Análise granulométrica – Camada de assentamento**

PENEIRA - ABERTURA DE MALHA	<b>Camada de ASSENTAMENTO</b>				
	Nº do ensaio: Média das 3 amostras Massa Total Ensaída (g): 3000				
mm	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada	Referência ABNT NBR 16416 (2015) (% retida acumulada)	Conformidade com a norma
12,5	0	0,0	0	0	SIM
9,5	0	0,0	0	0 a 15	SIM
4,75	3,03	0,1	0	70 a 90	NÃO
2,36	807,31	26,9	27	90 a 100	NÃO
1,16	636,92	21,2	48	95 a 100	NÃO
Fundo	1551,41	51,7	100		
<b>Total</b>	<b>2998,7</b>			<b>Dimensão Máxima Característica = 4,75mm</b>	
				Perda de material na execução - Erro = 0,045 %	

Fonte: Autor

É possível identificar que a distribuição granulométrica confirmou que o material é de fato mais fino do que deveria ser, tendo em vista que de 70 a 90% do material acumulado deveria ficar retido na peneira com abertura 4,75mm e esse valor foi de 0,1%, sendo ainda mais de 50% do material passante na peneira de abertura 1,16mm, quando esse valor deveria ser 0%. Os dois valores que constam na Tabela 7 como em conformidade com a norma, só representam que o material não tem a granulometria maior do que deveria, mas a análise é mantida de que o material utilizado, do ponto de vista granulométrico, é inadequado.

Os demais ensaios realizados são destacados pela ABNT NBR 16146 (2015): abrasão “Los Angeles”, material passante na peneira 0,075mm, dimensão máxima característica e o índice de vazios, Este último requer a realização do ensaio para determinação da massa específica do agregado seco, que também foi realizado.

A Tabela 8 indica os resultados dos ensaios para cada uma das propriedades e a avaliação da conformidade com as especificações da ABNT NBR 16416 (2015). O ensaio de abrasão “Los Angeles” não pôde ser realizado, pois o material não possui a granulometria mínima necessária para tal. Por este motivo, não existe entrada de valor na Tabela 8 para esse ensaio sendo definido como em não conformidade com a norma.

**Tabela 8 - Resultados dos ensaios - Material da camada de assentamento do pavimento permeável**

<b>Propriedade</b>	<b>Resultado - Ensaio</b>	<b>Especificação normativa - ABNT NBR 16416 (2015)</b>	<b>Conformidade com a norma</b>
Abrasão "Los Angeles"	-	< 40%	NÃO
Material passante na peneira 0,075mm	5,84%	≤ 2%	NÃO
Dimensão máxima característica	4,75 mm	9,5 mm	NÃO
Massa específica do agregado seco	2,531 g/cm <sup>3</sup>	-	-
Índice de vazios	27,89%	≥ 32%	NÃO

Fonte: Autor

Verifica-se que o agregado utilizado para a execução da camada de assentamento do pavimento permeável experimental não atende a nenhum dos requisitos especificados pela norma, resultando em um material inadequado para este uso. Destaca-se que o uso desse agregado mais fino do que deveria acarreta em uma maior probabilidade de colmatação do sistema, impactando na frequência de realização de manutenções e na vida útil.

#### 4.2.3 Revestimento permeável

Para analisar o revestimento do pavimento experimental com blocos de concreto permeável, foi tomada a amostra de 24 blocos representando o dobro da mínima indicada pela ABNT NBR 16416 (2015). Com a inspeção visual verificou-se a ausência de defeitos e delaminações significativas do concreto, sendo as peças homogêneas com arestas regulares.

A avaliação dimensional foi realizada com a utilização de um paquímetro para verificar a conformidade com a tolerância dimensional de  $\pm 3$  mm especificada pela norma. O bloco utilizado nesse estudo deve possuir 200mm de comprimento, 100mm de espessura e 80mm de espessura e a Tabela 9 indica as medições dos 24 blocos e o indicativo de sua variação ( $\Delta$ ) em relação aos valores nominais de referência. Foi possível identificar, em relação à tolerância dimensional, que apenas os blocos P9, P10 e P13 apresentaram variação ( $\Delta$ ) superior a 3mm (valores que estão destacados).

A amostra de 24 blocos, por fim, foi submetida ao ensaio de resistência mecânica à compressão simples objetivando avaliar se os blocos possuem a resistência mínima de 20MPa, conforme os critérios da ABNT NBR 16416 (2015). Para a realização do ensaio os blocos tiveram seu centro marcado em relação às placas circulares auxiliares de ensaio com 85mm de diâmetro, de acordo

com a especificação normativa da ABNT NBR 9781 (2013). A Tabela 9 apresenta os valores da carga que cada bloco suportou no ensaio e sua respectiva resistência à compressão em MPa, destacando que a área de carregamento é definida pela área circular do contato do bloco com as placas auxiliares (85mm).

**Tabela 9 – Ensaio nos blocos de revestimento – Avaliação dimensional e resistência à compressão**

Nº	Comprimento (mm)		Largura (mm)		Altura (mm)		Carga (N)	Área de carregamento (m <sup>2</sup> )	Resistência à compressão (MPa)
	Valor	Δ	Valor	Δ	Valor	Δ			
P1	200,85	0,85	102,35	2,35	82,20	2,20	58385	0,005675	10,29
P2	199,90	-0,10	100,50	0,50	81,75	1,75	67963	0,005675	11,98
P3	200,50	0,50	102,20	2,20	82,00	2,00	58561	0,005675	10,32
P4	200,25	0,25	102,50	2,50	81,55	1,55	55262	0,005675	9,74
P5	200,05	0,05	101,30	1,30	79,60	-0,40	59654	0,005675	10,51
P6	200,30	0,30	100,90	0,90	81,10	1,10	72242	0,005675	12,73
P7	200,35	0,35	102,40	2,40	81,20	1,20	56808	0,005675	10,01
P8	201,15	1,15	101,05	1,05	81,30	1,30	58282	0,005675	10,27
P9	201,25	1,25	103,70	3,70	82,50	2,50	63953	0,005675	11,27
P10	201,80	1,80	103,75	3,75	82,60	2,60	65871	0,005675	11,61
P11	201,20	1,20	101,35	1,35	82,65	2,65	66757	0,005675	11,76
P12	201,70	1,70	101,10	1,10	80,00	0,00	58983	0,005675	10,39
P13	203,80	3,80	101,05	1,05	82,45	2,45	66757	0,005675	11,76
P14	201,20	1,20	102,80	2,80	80,05	0,05	56375	0,005675	9,93
P15	201,70	1,70	102,95	2,95	81,45	1,45	58654	0,005675	10,34
P16	202,40	2,40	101,95	1,95	80,90	0,90	59643	0,005675	10,51
P17	202,65	2,65	101,90	1,90	82,20	2,20	61159	0,005675	10,78
P18	200,15	0,15	100,85	0,85	82,40	2,40	65736	0,005675	11,58
P19	201,60	1,60	101,80	1,80	79,15	-0,85	56066	0,005675	9,88
P20	201,35	1,35	100,75	0,75	81,10	1,10	58746	0,005675	10,35
P21	200,80	0,80	101,05	1,05	81,70	1,70	53035	0,005675	9,35
P22	201,30	1,30	101,10	1,10	81,75	1,75	58746	0,005675	10,35
P23	200,25	0,25	102,00	2,00	80,00	0,00	57612	0,005675	10,15
P24	200,10	0,10	100,50	0,50	79,95	-0,05	59633	0,005675	10,51
<b>Resistência à compressão média (Fp)</b>									<b>10,68</b>

Fonte: Autor

Nenhum dos blocos atingiu os 20 MPa e a média apresentada foi de 10,68 MPa. Como fator positivo, houve uma uniformidade nos valores indicada com um desvio padrão relativamente baixo, igual a 0,812. No entanto, sua resistência menor não deverá impactar o pavimento devido a sua tipologia para o tráfego exclusivo de pedestres e previsão de apenas baixa carga. Mas é



necessário deixar destacada a baixa resistência dos blocos que podem comprometer o uso em caso de tráfego leve de veículos, tipologia que deve ser atendida por este mesmo tipo de bloco comercial.

### 4.3 Dimensionamento do pavimento permeável

Na realização do dimensionamento do pavimento permeável, retoma-se a informação de que este estudo partiu de um perfil a ser executado na obra de reforma da POLI e dimensionado com 30cm de base, 5cm de camada de assentamento e 8cm da espessura do bloco de revestimento. Coube então avaliar se esta camada da base está em conformidade com o dimensionamento da ABNT NBR 16416 (2015), a partir dos resultados dos ensaios específicos e determinações necessárias.

A chuva de projeto, que é um parâmetro essencial para o dimensionamento hidráulico do pavimento permeável, definida de acordo com a equação IDF para o Recife (Equação 2) e adotando os valores indicados na ABNT NBR 16416 (2015) de duração da chuva igual a 60 minutos e tempo de retorno de 10 anos é indicada na Equação 5.

$$i = \frac{611,3425 * 10^{0,1671}}{(60+7,3069)^{0,6348}} = 62,08\text{mm/h} \quad (\text{Equação 5})$$

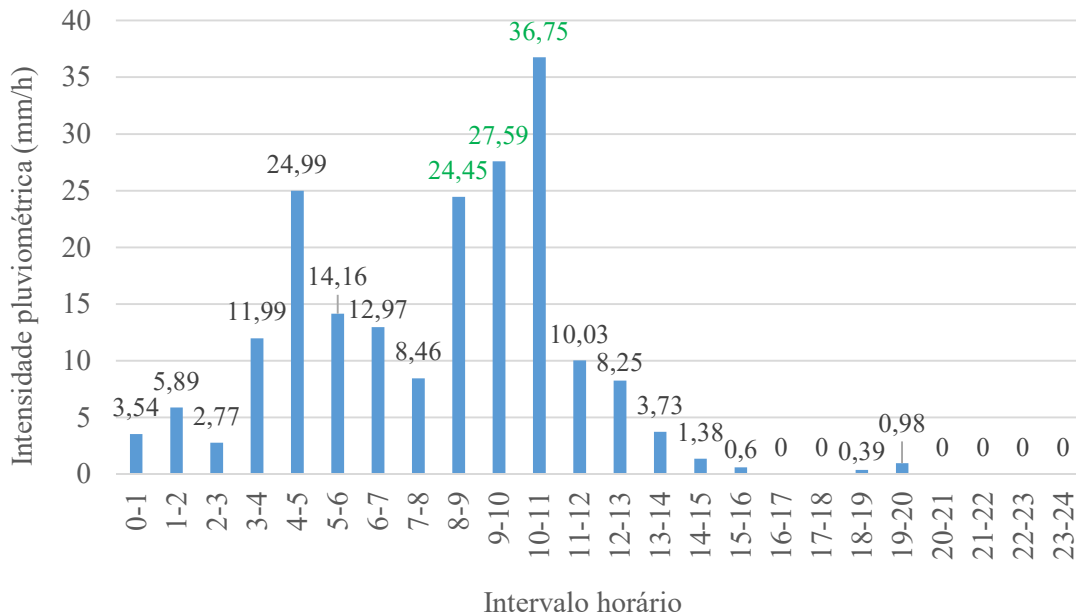
Então, a chuva de projeto assumiria o valor de 62,08 mm/h e atenderia ao que propõe a norma do pavimentos permeáveis. No entanto, analisando dados reais de chuva da APAC (2023) e do CEMADEN (2023), com a intenção de encontrar a chuva mais intensa nos últimos 10 anos, verificou-se que esta ocorreu no dia 28/05/2022, e sua distribuição horária é apresentada na Figura 50.

A partir da análise da maior chuva na região, poderia-se assumir como chuva de projeto um valor correspondente ao somatório do intervalo mais crítico de intensidade (3h, durante 08h e 11h) de 88,79 mm. Isso significa supor que esse intervalo ocorreu em apenas 1h de duração, indicando um valor elevado e significativo de precipitação. No entanto, esse valor de 88,79mm/h é comparável com a aplicação da equação IDF para um tempo de retorno de 10 anos e duração adotada da chuva igual a 30min, que resulta em 90,28mm/h.

Ou seja, o valor de precipitação para o intervalo mais crítico (3h) da chuva mais intensa dos últimos 10 anos, agrupados em apenas 1h de chuva, é equivalente à aplicação da equação IDF

com duração de 30min. Este, por ser levemente superior, foi o valor adotado para a chuva de projeto deste estudo, igual a 90,28mm/h.

**Figura 50 - Distribuição horária da precipitação do dia 28/05/2022 em Recife**



Fonte: Autor. Dados: CEMADEN (2023)

Então, o valor da chuva de projeto igual a 90,28mm/h atende a especificação normativa e considera um evento de precipitação crítico ocorrido em Recife no intervalo do tempo de retorno especificado de 10 anos, apresentando-se como um valor elevado, representativo e pertinente para o dimensionamento do pavimento permeável.

Para determinação da espessura da camada de base, além do valor da chuva de projeto, são necessários outros dados: o valor de R que correlaciona a área de contribuição e a área do pavimento permeável; a taxa de infiltração do solo; o tempo efetivo de enchimento do reservatório; e o índice de vazios da camada.

A área de contribuição definida para este estudo poderia ser zero, isso porque todas as adjacências do módulo experimental permeável também são constituídas de pavimentação permeável e as duas construções que poderiam contribuir para o incremento da entrada de água no pavimento (Bloco A da POLI e a nova cantina construída) possuem sistemas de drenagem pluvial individualizadas e canalizadas. No entanto, o cenário mais desfavorável no dimensionamento é a adoção do valor de R igual a 5 (limite máximo definido pela ABNT NBR 16416 (2015), por isso foi o valor adotado.

A taxa de infiltração do solo foi obtida através do ensaio de permeabilidade, como indica a norma, e possui o valor de  $2,3 \times 10^{-1}$  m/h e o índice de vazios do agregado que compõe a base é 42,77%, ambos valores apresentados anteriormente. Por fim, o tempo efetivo de enchimento do reservatório é adotado pela ABNT NBR 16416 (2015) como igual a 2h. Aplicando a Equação 3, com a chuva de projeto de 90,28mm adotada em metros, encontra-se uma espessura de base aproximadamente igual a 19 cm, conforme a Equação 6.

$$H_b = \frac{(90,28 \times 10^{-3} * 5) + (90,28 \times 10^{-3}) - (2,3 \times 10^{-1} * 2)}{0,4277} \cong 0,193m \quad (\text{Equação 6})$$

O dimensionamento mecânico do pavimento permeável, considerando o método da prefeitura municipal de São Paulo proposto por Senço (2007), com o ábaco e as tabulações indicam uma espessura da base igual a 8cm para o tráfego muito leve e o valor do índice de suporte califórnia (ISC/CBR) igual a 34% encontrado no ensaio de solo do subleito.

Assim, conclui-se o dimensionamento do pavimento permeável experimental admitindo o maior dos valores entre os encontrados no hidráulico e no mecânico, assumindo então o valor de 19,3 cm ou aproximadamente 20 cm. Logo, a avaliação final em relação ao dimensionamento é que a espessura da camada de base executada igual a 30 cm está em conformidade e com folga em relação ao dimensionamento realizado igual a 20cm.

#### 4.4 Monitoramento dos níveis d'água

O monitoramento dos níveis de água no lençol freático foi realizado continuamente na área do entorno da instalação do pavimento permeável através dos 3 piezômetros (PZ01, PZ02 e PZ03) instalados em estudos anteriores a este, na área da POLI-UPE. Este monitoramento contínuo, ocorreu no período de setembro de 2022 a abril de 2023 e a realização da aferição com o equipamento de medição do nível d'água manual está representado na Figura 51, destacando-se que a medição ilustrada é no piezômetro PZ01 e realizada em 04/10/2022.

Quanto aos 4 piezômetros instalados no pavimento experimental (PZN01, PZN02, PZN03 e PZN04), estes foram monitorados de janeiro a abril de 2023. O início apenas em janeiro foi devido à execução do pavimento permeável. No entanto, dentre os 7 piezômetros disponíveis para medições, apenas 3 apresentaram dados 100% contínuos, isto é, em todos os dias de medição, resultaram em leituras válidas. O motivo para tal é a obstrução dos piezômetros ou a necessidade de aumento das profundidades deles.

Porém, os 3 piezômetros com 100% das leituras válidas representam bem o objetivo proposto pois são os piezômetros PZ01, PZ02 e PZN04, localizados um em cada área. Ressalta-se que o PZ03 é muito próximo do PZ02 e os outros (PZN01, PZN02 e PZN03) são bem próximos ao PZN04 (Figura 40).

**Figura 51 – Realização da medição do nível d'água com o equipamento manual**

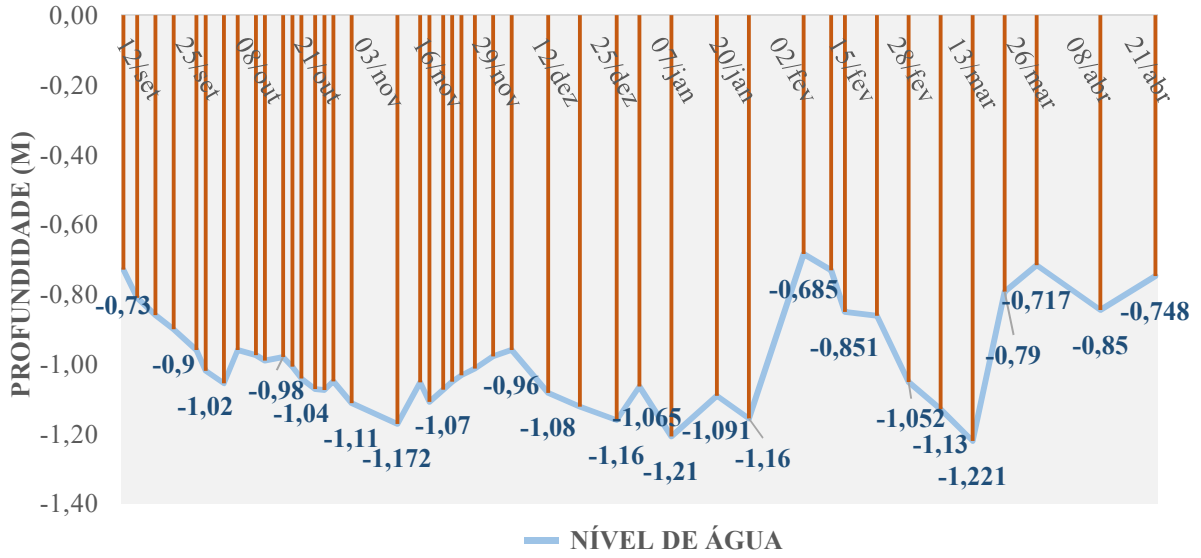


Fonte: Autor

As 44 medições em PZ01 e PZ02 e as 15 medições em PZN04 foram distribuídas em gráficos que representam as variações do nível de água do lençol freático na área de entorno e no pavimento permeável experimental. É necessário pontuar que a avaliação de variação do nível é para o mesmo piezômetro, sendo possível observar a variação do nível de água do lençol freático para cada um deles.

As Figuras 52, 53 e 54 indicam a variação do lençol freático para os 3 piezômetros PZ01, PZ02 e PZN04, respectivamente. Nas figuras, têm-se a parte gráfica e a tabela dos dados. Nas Figuras 52 e 53, nem todos os valores de medição estão indicados no gráfico, mas todos constam na tabela de dados, pelo motivo de uma melhor visualização do gráfico e da variação do lençol freático ao longo do período. Na Figura 54, por apresentar menor volume de dados, todos eles estão rotulados na área gráfica.

**Figura 52 – Monitoramentos do nível d’água em PZ01**



Data	NA (m)	Data	NA (m)	Data	NA (m)	Data	NA (m)
12/set	-0,73	19/out	-1,01	25/nov	-1,03	08/fev	-0,69
15/set	-0,81	21/out	-1,04	28/nov	-1,01	14/fev	-0,73
19/set	-0,86	24/out	-1,07	02/dez	-0,98	17/fev	-0,85
23/set	-0,90	26/out	-1,08	06/dez	-0,96	24/fev	-0,86
28/set	-0,96	28/out	-1,05	14/dez	-1,08	03/mar	-1,05
30/set	-1,02	01/nov	-1,11	21/dez	-1,12	10/mar	-1,13
04/out	-1,06	11/nov	-1,17	29/dez	-1,16	17/mar	-1,22
07/out	-0,96	16/nov	-1,05	03/jan	-1,07	24/mar	-0,79
11/out	-0,98	18/nov	-1,11	10/jan	-1,21	31/mar	-0,72
13/out	-0,99	21/nov	-1,07	20/jan	-1,09	14/abr	-0,85
17/out	-0,98	23/nov	-1,05	27/jan	-1,16	26/abr	-0,75

Fonte: Autor

**Figura 53 - Monitoramentos do nível d’água em PZ02**

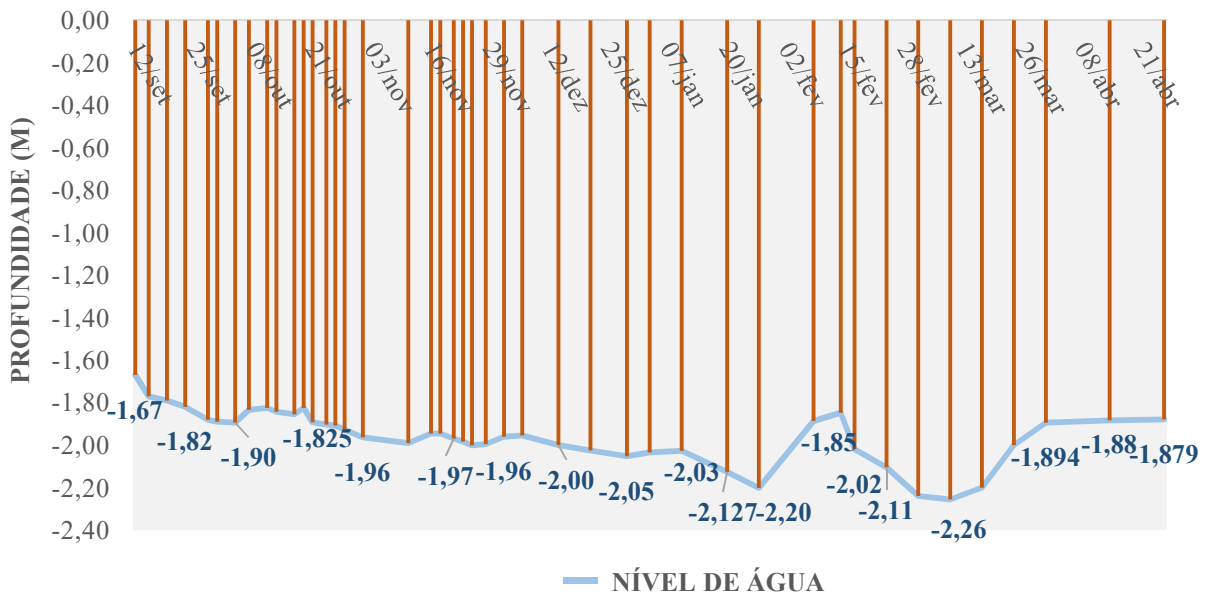
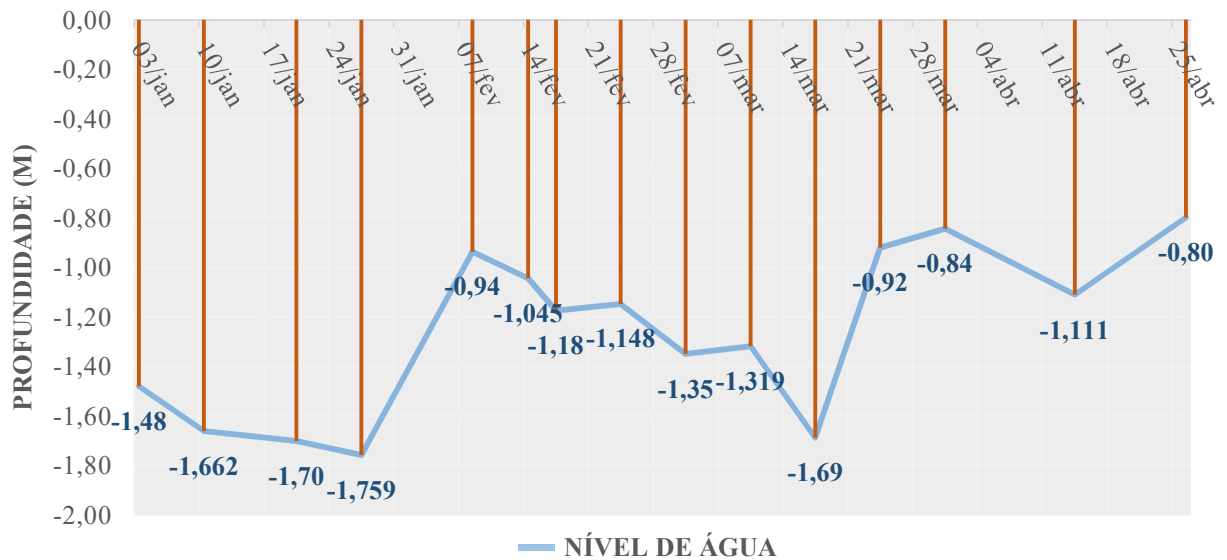


Figura 53 - Monitoramentos do nível d'água em PZ02 (Cont.)

Data	NA (m)	Data	NA (m)	Data	NA (m)	Data	NA (m)
12/set	-1,67	19/out	-1,83	25/nov	-2,00	08/fev	-1,89
15/set	-1,77	21/out	-1,89	28/nov	-2,00	14/fev	-1,85
19/set	-1,79	24/out	-1,90	02/dez	-1,96	17/fev	-2,02
23/set	-1,82	26/out	-1,91	06/dez	-1,96	24/fev	-2,11
28/set	-1,88	28/out	-1,93	14/dez	-2,00	03/mar	-2,24
30/set	-1,89	01/nov	-1,96	21/dez	-2,03	10/mar	-2,26
04/out	-1,90	11/nov	-1,99	29/dez	-2,05	17/mar	-2,20
07/out	-1,83	16/nov	-1,95	03/jan	-2,03	24/mar	-2,00
11/out	-1,83	18/nov	-1,95	10/jan	-2,03	31/mar	-1,89
13/out	-1,84	21/nov	-1,97	20/jan	-2,13	14/abr	-1,88
17/out	-1,86	23/nov	-1,98	27/jan	-2,20	26/abr	-1,88

Fonte: Autor

Figura 54 – Monitoramentos do nível d'água em PZN04



Data	NA (m)	Data	NA (m)	Data	NA (m)	Data	NA (m)
03/jan	-1,48	08/fev	-0,94	03/mar	-1,35	31/mar	-0,84
10/jan	-1,66	14/fev	-1,05	10/mar	-1,32	14/abr	-1,11
20/jan	-1,70	17/fev	-1,18	17/mar	-1,69	26/abr	-0,80
27/jan	-1,76	24/fev	-1,15	24/mar	-0,92		

Fonte: Autor

É possível concluir com as medições realizadas, que o lençol freático varia e a amplitude das variações tem relação com as precipitações, ou seja, em períodos sem chuvas o nível do lençol freático tende a ser mais profundo. Em contrapartida, eventos chuvosos tendem a diminuir a profundidade do nível de água trazendo-o para mais próximo da superfície. Ratifica-se com a observação dos gráficos e dados que o comportamento do lençol assemelha-se temporalmente entre os piezômetros, como era o esperado, tendo em vista que a movimentação do lençol é contínua, elevando-se ou rebaixando-se.

Nos períodos analisados o menor e o maior nível do lençol para PZ01 são respectivamente: 0,69m (08/02/2023) e 1,22m (17/03/2023). Da mesma forma para PZ02: 1,67m (12/09/2022) e 2,26m (10/03/2023) e para PZN04: 0,80 (26/04/2023) e 1,76 (27/01/2023). É possível destacar também que por mais que as datas das medições extremas não sejam coincidentes, fator justificado devido às condições pontuais de cada um dos 3 piezômetros, distantes entre si, a tendência de elevação ou rebaixamento do nível são similares em todas as datas. Concretiza-se então o objetivo de uma avaliação consistente da variação do nível do lençol freático.

#### 4.5 Análise do desempenho hidráulico

##### 4.5.1 Ensaios de permeabilidade do pavimento

A avaliação do coeficiente de permeabilidade do pavimento permeável experimental foi realizada de acordo com a metodologia específica proposta no anexo A da ABNT NBR 16416 (2015). Através da realização do ensaio com o anel de infiltração é encontrado um importante parâmetro da eficiência de infiltração do pavimento permeável. O coeficiente de permeabilidade é também necessário na avaliação do revestimento utilizado, precisando atingir valores acima de  $10^{-3}$  m/s para o pavimento recém construído com a finalidade de sua permeabilidade ser aprovada, de acordo com a respectiva norma nacional.

Para aplicação da metodologia proposta para o ensaio, registram-se alguns dados necessários para a determinação do coeficiente de permeabilidade, conforme a Equação 7.

$$k = \frac{C * m}{d^2 * t} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

k: coeficiente de permeabilidade (em mm/h);

C: fator de conversão de unidades do sistema SI, com valor igual a 4.583.666.000

m: massa de água infiltrada (em kg).

d: diâmetro interno do anel de infiltração (em mm)

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

Os ensaios foram realizados em 3 dias (03/03/2023, 10/03/2023 e 17/03/2023) e os valores do coeficiente de permeabilidade foram obtidos de acordo com a aplicação da Equação 7. A escolha das datas visou a avaliação da permeabilidade do pavimento recém construído que teve a sua finalização completa apenas em fevereiro de 2023.

Para cada um dos dias, 3 pontos foram ensaiados com uma repetição de medição resultando em 6 medições válidas por dia. Todos os valores calculados para o coeficiente de permeabilidade estão indicados na Tabela 10, com a indicação dos pontos (1, 2 ou 3), da data do ensaio e se o valor representa a primeira ou a segunda medição no ponto (K1 ou K2).

**Tabela 10 – Coeficiente de permeabilidade determinados por ensaio**

Data	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	K1 (m/s)	K2 (m/s)	K1 (m/s)	K2 (m/s)	K1 (m/s)	K2 (m/s)
03/03/2023	1,19E-03	1,21E-03	3,92E-03	3,87E-03	3,84E-03	3,80E-03
10/03/2023	2,74E-03	2,59E-03	3,38E-03	3,16E-03	4,35E-03	4,24E-03
17/03/2023	1,11E-03	1,02E-03	4,39E-03	4,59E-03	4,79E-03	4,50E-03

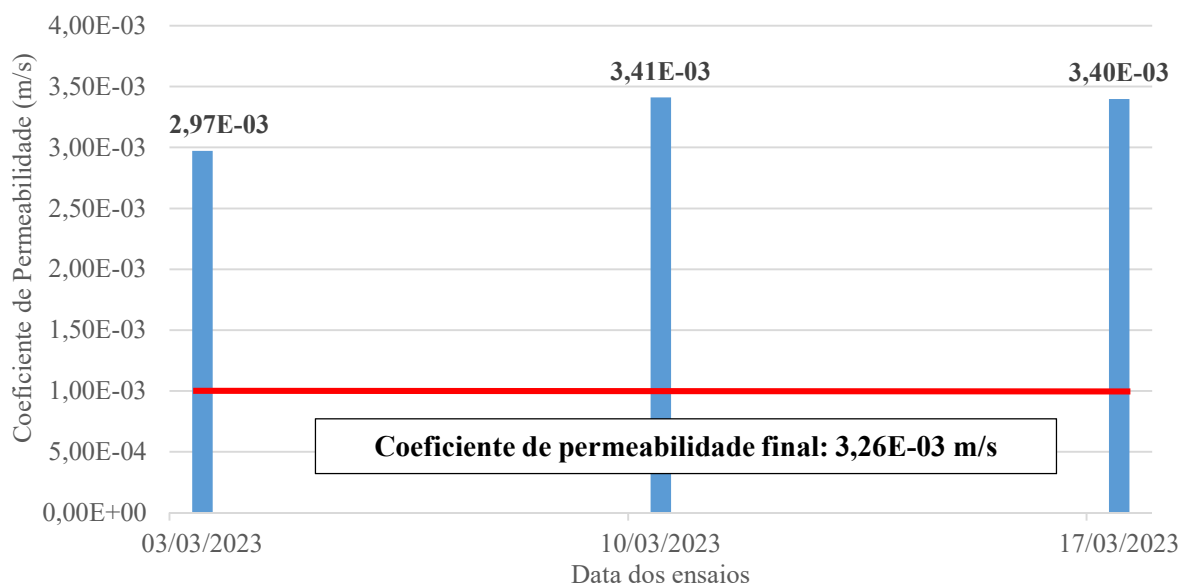
Fonte: Autor

É possível observar que todos os valores encontrados estão de acordo com a indicação normativa de alta permeabilidade, isto é, superiores a  $10^{-3}$  m/s. Enfatiza-se que os pontos indicados foram os mesmos para os três dias de ensaios (com variações de no máximo, poucos centímetros) pois as suas respectivas áreas ficaram demarcadas com fita. Vale destacar ainda que, por mais que o coeficiente de permeabilidade resultante seja a média para cada dia, o ponto 1 se apresentou nas 3 datas de medição como possuidor de uma permeabilidade mais baixa que os outros dois pontos, este fator pode indicar uma não uniformidade de permeabilidade, o que é negativo para o pavimento. Mas, mesmo com valores abaixo dos outros dois pontos, ainda assim, os coeficientes de permeabilidade do ponto 1 são superiores a  $10^{-3}$  m/s.

Pontuada essa observação, ratifica-se que o coeficiente de permeabilidade do pavimento permeável experimental recém construído para a área de 27m<sup>2</sup> (onde os 3 pontos de medição estão bem distribuídos) é o resultado da média entre os 3 dias de medição. Para uma visualização gráfica, a Figura 55 apresenta os coeficientes médios para cada data ensaiada, sendo indicado por uma linha vermelha o limite normativo de  $10^{-3}$  m/s e destacado também o valor final de permeabilidade calculado.

O valor de permeabilidade do pavimento encontrado igual a  $3,26 \times 10^{-3}$  m/s indica uma alta permeabilidade, indicando que por este critério de análise o pavimento tem um bom desempenho hidráulico na capacidade de infiltração da água de chuva que caia sobre ele. Outra forma interessante de se apresentar a permeabilidade do pavimento é apresentá-lo como sendo 3,26 mm a cada segundo.



**Figura 55 - Permeabilidade do pavimento experimental recém construído**

Fonte: Autor

#### 4.5.2 Simulações hidráulicas de lâminas superficiais de chuva em campo

As simulações hidráulicas de lâminas superficiais de chuva realizadas no pavimento permeável experimental objetivaram avaliar o comportamento a dois eventos similares a precipitações intensas. Para isso, os valores dos níveis d'água obtidos com o medidor automático no intervalo a cada minuto foi confrontado com a intensidade de chuva produzida, sendo avaliado também as condições anteriores aos ensaios e as recuperações do sistema pós eventos simulados através do processo de infiltração.

Destaca-se que os dados obtidos referem-se ao sistema permeável completo, composto pelo pavimento permeável em si e o solo do subleito. Ainda retoma-se que o pavimento permeável é composto, em termos de espessura, por um revestimento de 8cm, uma camada de assentamento de 5cm e uma base de 30cm, totalizando 43cm (as espessuras das mantas geotêxtil, são pequenas, não alterando o valor total) onde encontra-se a interface entre o final da camada de base e o início do subleito.

A necessidade de avaliação das condições anteriores à realização dos ensaios foi importante para o entendimento de como o nível de água se comportou, justificável devido às condições de saturação do solo. Quando o sistema é exposto a água e necessita infiltrá-la, a umidade do solo é determinante para a velocidade de infiltração. A umidade do solo foi avaliada neste estudo correlacionando os eventos de chuva ao qual o sistema foi exposto anteriormente a realização das simulações.

Em relação às condições posteriores aos ensaios, o objetivo das análises foi entender a forma como o sistema se recupera à condição inicial antes do ensaio, em quanto tempo isso acontece e os fatores que influenciam esse processo. Através desses resultados e em conjunto com o comportamento do sistema durante a realização dos ensaios propriamente ditos, foi possível avaliar o desempenho do pavimento permeável experimental face a eventos simulados de lâmina superficial de precipitação intensa.

A primeira simulação foi realizada no dia 25/02/2023 com a utilização da área completa do pavimento experimental (27m<sup>2</sup>). Os 2000 litros (1m<sup>3</sup> de cada tanque) foram colocados nessa área, mas devido ao desnível e algumas irregularidades na área total, a área da lâmina onde de fato a água infiltrou e o ensaio se realizou foi de aproximadamente 16,4m<sup>2</sup>, valor calculado através da marcação da área molhada que fica pós o ensaio e confirmada com as filmagens do ensaio.

A Figura 56 apresenta a área efetiva do ensaio visualizada em duas imagens. A área irregular que se visualiza na Figura 56a e também a área retangular onde estão os tanques, ilustrada na Figura 56b. Ressalta-se o fato dessa lâmina ser visível enquanto o pavimento ainda estava recebendo água dos tanques, sendo completamente infiltrada antes mesmo dos tanques esvaziarem completamente, pois a vazão de saída de água deles vai sendo reduzida a medida que o tempo passa. Fato justificado hidráulicamente devido à saída dos tanques serem orifícios e a medida que a altura de água acima do orifício vai se tornando menor, a velocidade e, conseqüentemente, sua vazão de saída também se reduzem, até o completo esvaziamento.

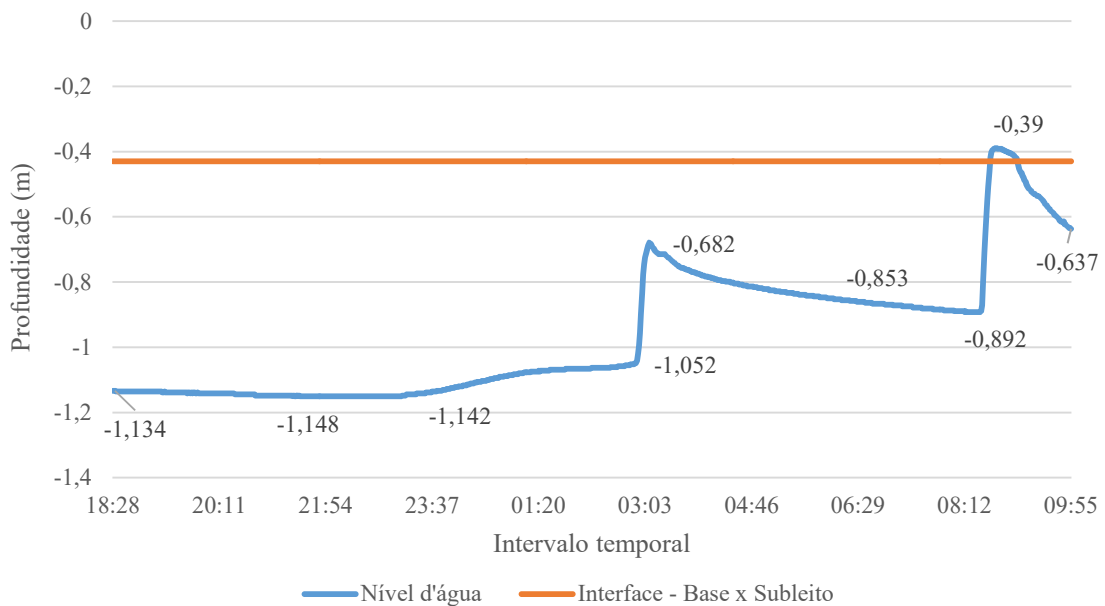
**Figura 56 – Lâmina d'água representando a área efetiva da simulação nº01. Área irregular e efetiva do ensaio (a), área de localização dos tanques de 1000L (b)**



Fonte: Autor

As condições anteriores ao ensaio foram analisadas e representadas no gráfico (Figura 57). É possível observar que de 18:28h do dia 24/02 (anterior ao ensaio) até o início do ensaio às 09:55h do dia 25/02, o pavimento permeável recebeu precipitações, sendo uma delas 1h antes do ensaio, elevando o nível d'água de 0,89m para 0,39m. Depois dessa precipitação o sistema no seu processo de recuperação por infiltração rebaixou o nível de água até a profundidade de 0,637, onde se iniciou o ensaio de simulação. A APAC (2023) registrou acumulados de chuva para o dia 25/02 com valor de 19mm (posto pluviométrico Santo Amaro), ocorrendo esse volume até o ensaio, porque após a simulação não mais precipitou no local durante o dia 25/02.

**Figura 57 – Comportamento do sistema permeável anterior a realização da simulação nº01**

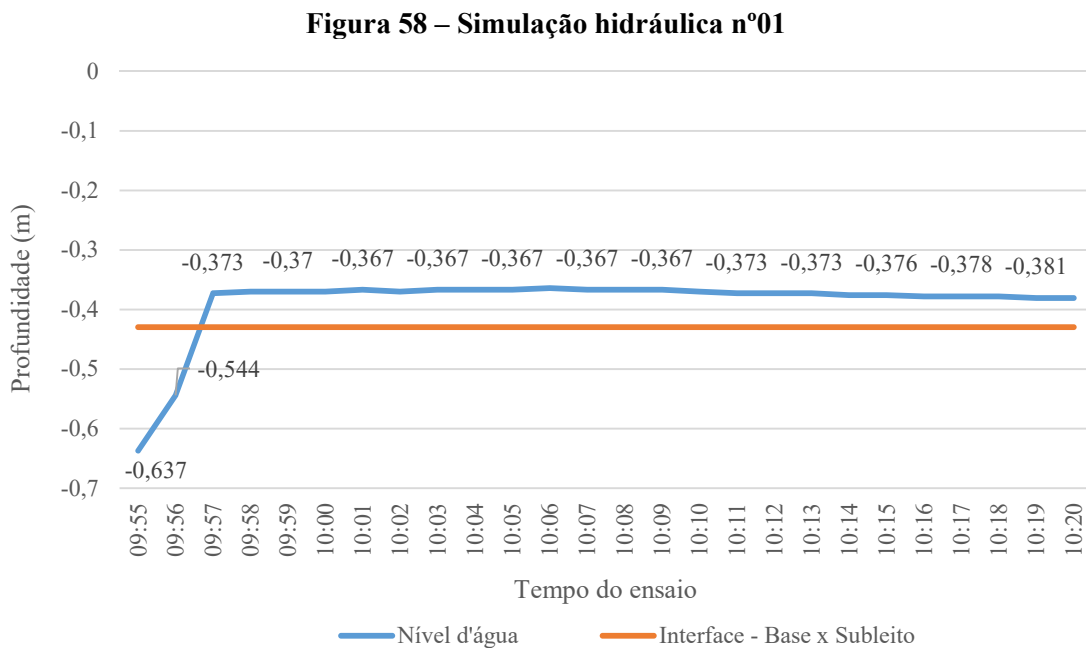


Fonte: Autor

Ressalta-se que é notável o comportamento do pavimento experimental variando de acordo com a precipitação que ele recebe ou não. Ou seja, o nível de água do sistema eleva-se quando chove e tem-se contato com a água ocorrendo a infiltração e, conseqüentemente, a subida do nível. O processo é inverso quando o volume infiltrado cessa, permitindo que a água já infiltrada continue o seu processo, rebaixando assim o nível de água do sistema.

Destaca-se também que, quanto mais chuva ele recebe, mais água se infiltra, mais saturado fica o solo e o processo de infiltração vai se tornando mais lento. Em relação ao gráfico da Figura 57, ele se apresenta com a visualização de apenas alguns valores, devido ao grande número de dados (leituras a cada minuto), sendo escolhidos para serem rotulados justamente valores representativos para o entendimento do comportamento.

A primeira simulação hidráulica foi realizada então com os 2m<sup>3</sup> de água em uma área efetiva de 16,4m<sup>2</sup>, resultando em uma precipitação aproximada de 121,95mm, este sendo um valor nominal, pois existiram pequenas perdas de volume de água devido a não estanqueidade completa da vedação da área ensaiada, resultando em uma valor real ligeiramente menor. O ensaio em si, durou 25 minutos, com o esvaziamento total dos reservatórios em 14 minutos e o restante do tempo com leituras por minutos do nível d'água. O comportamento do sistema durante o período do ensaio está representado na Figura 58, pontuando-se novamente que, buscando uma melhor visualização, somente alguns valores foram rotulados no gráfico.



Fonte: Autor

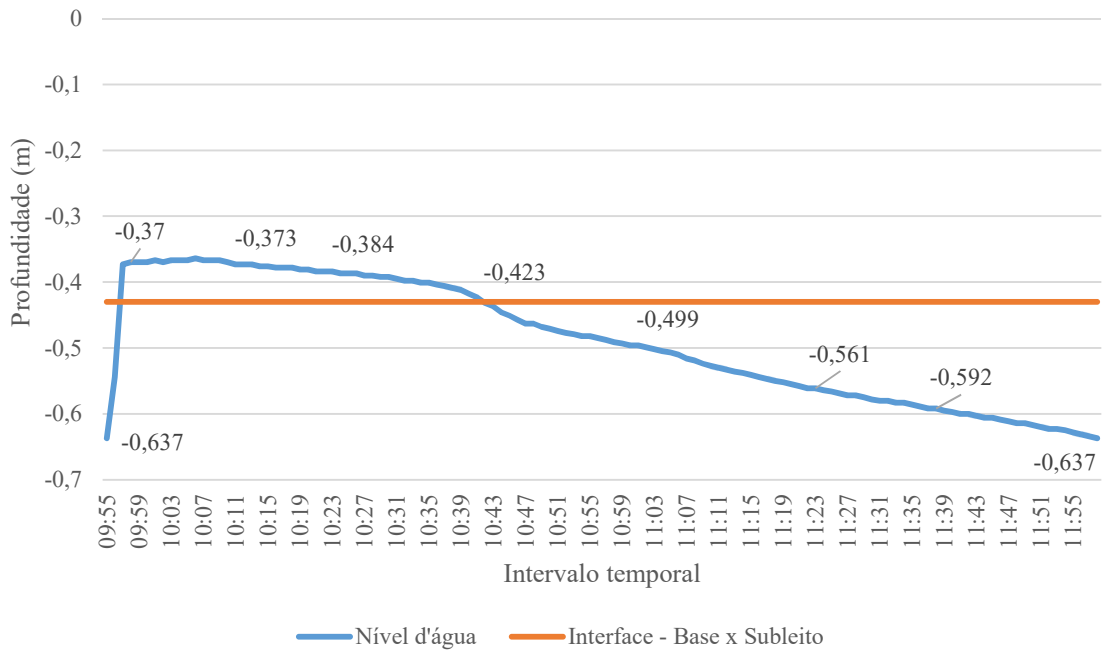
Como pode ser observado graficamente, o ensaio se iniciou com o nível de água na profundidade de 0,637m e após um elevação rápida do nível, manteve-se praticamente estável durante o ensaio. Do instante 0 até 2 minutos o comportamento é de ascensão rápida, inclusive mantendo o nível de água dentro da camada base do reservatório do pavimento permeável (profundidade de 0,43m) desde passado o primeiro minuto até a finalização do ensaio. O que se depreende desse comportamento verificado é que o pavimento manteve sua taxa de infiltração similar à taxa de entrada de água no sistema, durante praticamente todo o ensaio após os primeiros minutos, resultando em um bom desempenho hidráulico de infiltração, considerando o alto volume de água no curto período de tempo (chuva aproximada de 121,95mm).

Observou-se a formação de uma pequena lâmina de água na área efetiva de ensaio (16,4m<sup>2</sup>), mas considerada normal, dado o volume excessivo de entrada de água, principalmente na primeira metade do tempo de esvaziamento do reservatório, ou seja nos primeiros 7 minutos, sendo reduzida à medida que a vazão de saída tornava-se menor. Antes do esvaziamento completo dos tanques nos 14 minutos de ensaio, as lâminas superficiais não mais existiam, tendo a água infiltrado completamente.

A justificativa para a formação dessa lâmina (visível na Figura 56), além do que foi destacado, é pelo fato da própria permeabilidade do pavimento, mesmo sendo bastante alta, não conseguir responder instantaneamente ao elevado volume de água em um intervalo tão pequeno de tempo. Mas a partir da entrada de água no sistema, a sua taxa de infiltração e percolação para o solo é suficiente para não permitir a ascensão do nível de água ao valor de profundidade igual a zero, o que resultaria em acúmulo significativo de volumes de água na superfície do pavimento, pois o sistema não mais permitiria a infiltração até que o nível d'água rebaixasse e permitisse a sua entrada.

Outra análise realizada foi a condição de recuperação do pavimento permeável após a realização da simulação. Para tal, verificou-se em quanto tempo o sistema retornou à condição inicial pré-ensaio, isto é, ao mesmo valor de nível d'água. Destaca-se que provavelmente o pavimento não se comportaria de forma igual para um mesmo evento simulado a partir desse novo ponto de igualdade, pois o solo se encontraria mais saturado, dificultando a resposta do pavimento. No entanto, para esta primeira simulação realizada, foi identificado que o pavimento encontrava-se com certo nível de saturação, tendo em vista as precipitações ocorridas no local, nas horas anteriores ao início do ensaio e mesmo assim, ele obteve um bom comportamento hidráulico enquanto técnica compensatória de infiltração.

A Figura 59 mostra a recuperação do pavimento permeável após a realização do ensaio. O gráfico inicia com o momento inicial às 09:55h do dia 25/02, com a ascensão do nível de água causada pela realização do ensaio e é finalizado quando o nível de água retorna à condição inicial do ensaio, igual a 0,637m de profundidade, ocorrendo em aproximadamente 2h após, às 11:58h. O pavimento recuperou-se rapidamente para a simulação de lâmina superficial de chuva intensa e salienta-se que não ocorreu precipitação natural nesse intervalo de tempo de recuperação analisado.

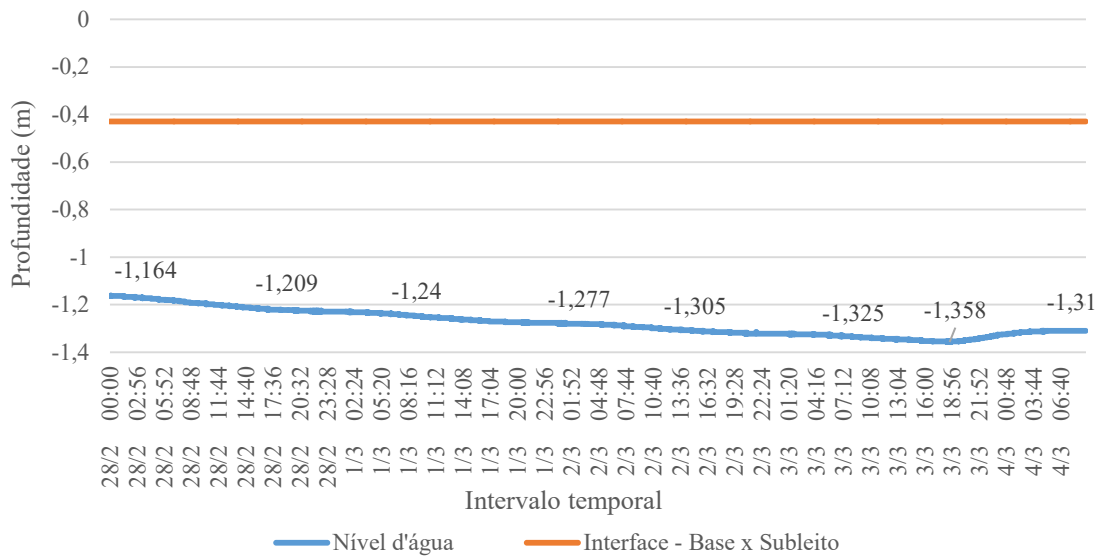
**Figura 59 – Recuperação do sistema permeável – Simulação n°01**

Fonte: Autor

A segunda simulação foi realizada no dia 04/03/2023 buscando avaliar o comportamento do pavimento permeável a uma lâmina superficial simulada mais intensa e sob outra condição prévia de ensaio. Para isso, foi definida uma área retangular de 9,45m<sup>2</sup> e sob essa área os mesmos 2000 litros de água da primeira simulação foram colocados na área menor, promovendo uma chuva de aproximadamente 211,64mm. Além da diferenciação na intensidade da precipitação, foi avaliado também a resposta do pavimento sob uma condição prévia de ausência de chuvas naturais, ou seja, com o sistema praticamente não saturado.

Avaliando essa condição prévia da realização do ensaio, a APAC (2023) mostrou que nos 5 dias anteriores ao ensaio não choveu (posto pluviométrico Santo Amaro) e a condição de saturação do sistema era baixa, com o nível de água em um patamar de 1,310m de profundidade no início do ensaio, valor este bem mais profundo que o inicial da primeira simulação (0,637m). A Figura 60 apresenta graficamente essa condição anterior ao ensaio, com os valores aferidos e alguns deles destacados no gráficos.

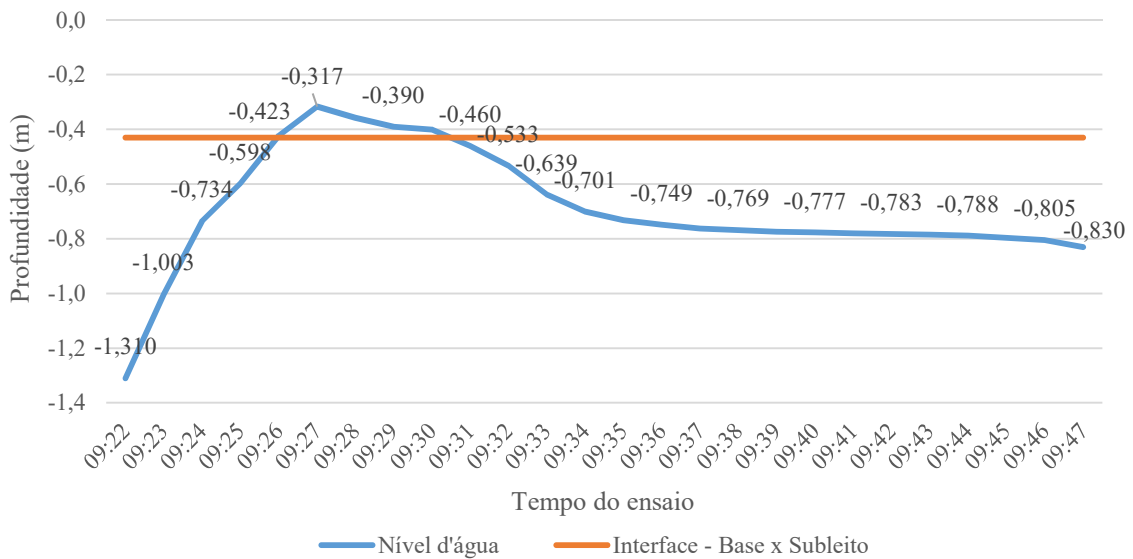
**Figura 60 – Comportamento do sistema permeável anterior a realização da simulação nº02**



Fonte: Autor

O ensaio da simulação iniciou às 09:22h do dia 04/03 com o nível d’água registrado de 1,31m. Similarmente ao que ocorreu na primeira simulação, os primeiros minutos foram de rápida ascensão do nível d’água, atingindo o valor mínimo de profundidade igual a 0,317m após 5 minutos do início do ensaio. Após esse movimento, o sistema foi rebaixando o nível d’água, ainda durante o ensaio, diferentemente do que ocorreu na primeira simulação, justificável pela condição de infiltrabilidade mais favorável do solo e do sistema, pela sua menor saturação em comparação ao primeiro ensaio. A Figura 61 mostra o comportamento do gráfico durante o período de ensaio.

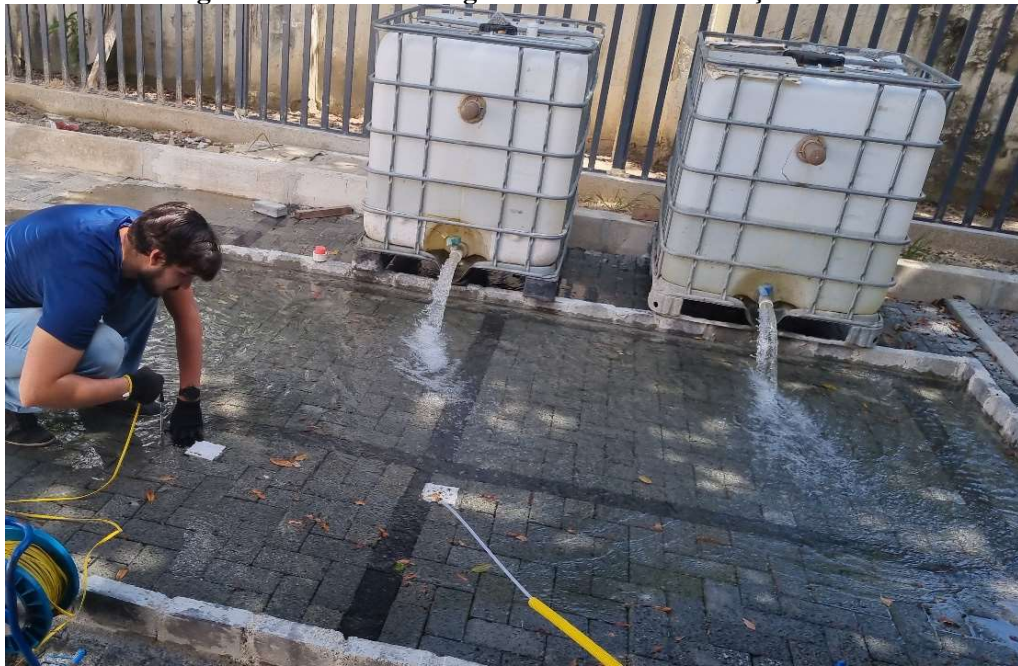
**Figura 61 – Simulação hidráulica nº02**



Fonte: Autor

O ensaio novamente teve a duração de 25 minutos com os tanques esvaziando totalmente em 11 minutos e os outros 14 minutos foram de leituras por minutos do nível d'água para acompanhamento com as medições. Salienta-se que a lâmina de água formada foi completamente infiltrada antes do esvaziamento total dos reservatórios, assim como ocorreu na primeira simulação. A Figura 62 mostra a máxima lâmina formada, na execução do ensaio. Na imagem também é possível identificar que os tanques estão elevados em relação ao que foi desenvolvido na primeira simulação.

**Figura 62 - Lâmina d'água formada na simulação nº02**

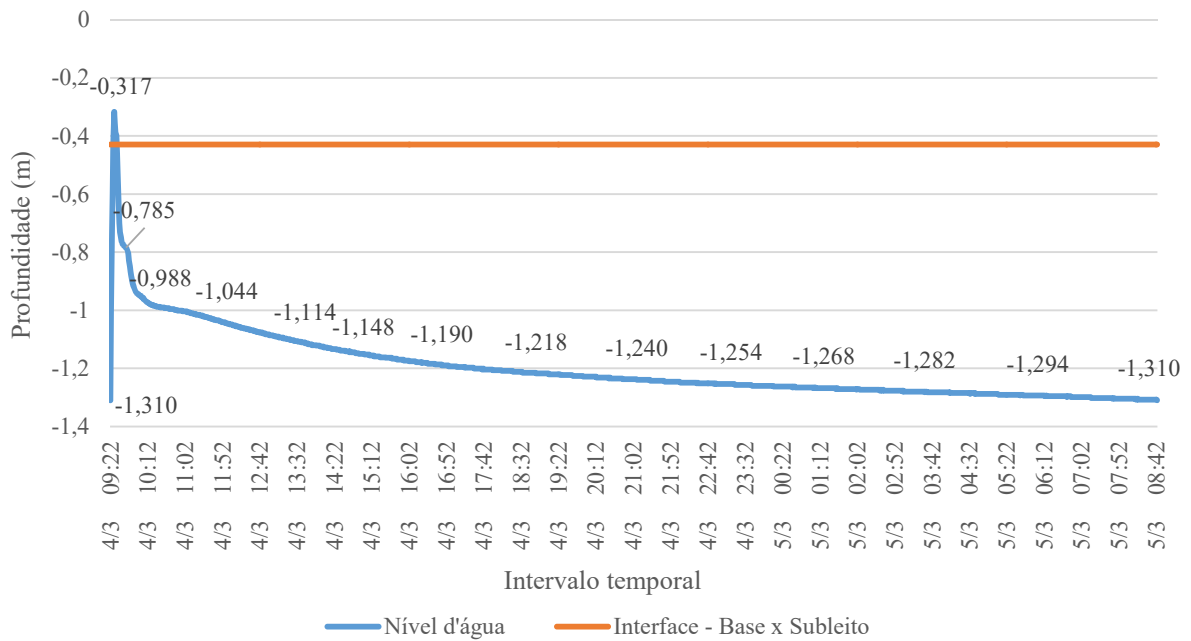


Fonte: Autor

O pavimento permeável novamente teve um bom desempenho hidráulico ao ser submetido a uma simulação de lâmina superficial de chuva intensa de 211,64mm, enfatizando que este valor é nominal e a precipitação real é um pouco menor por perdas de volume devido à não estanqueidade completa da vedação da área ensaiada, observando essa perda na Figura 62 com parte da água fora da área ensaiada.

Em relação à recuperação do pavimento após o ensaio, a Figura 63 apresenta o gráfico demonstrando que foi necessário mais tempo do que as 2h necessárias na primeira simulação para o pavimento voltar à condição pré-ensaio. Ocorrendo em aproximadamente 24h o retorno a uma condição similar, com o nível de água aferido às 08:43h (dia 05/04) em 1,310m de profundidade, igual ao valor na condição inicial do ensaio às 09:22h (dia 04/04).



**Figura 63 - Recuperação do sistema permeável – Simulação n°02**

Fonte: Autor

Conclui-se das duas simulações hidráulicas realizadas, que o pavimento permeável obteve um bom desempenho hidráulico enquanto dispositivo de infiltração. As simulações de lâminas superficiais de precipitações intensas resultaram em uma boa resposta do pavimento a receber altos volumes de água ( $2\text{m}^3$  em cada simulação), sendo analisada uma condição mais saturada e uma menos saturada do sistema, além das avaliações positivas de recuperação do pavimento permeável para as condições prévias à realização dos ensaios.

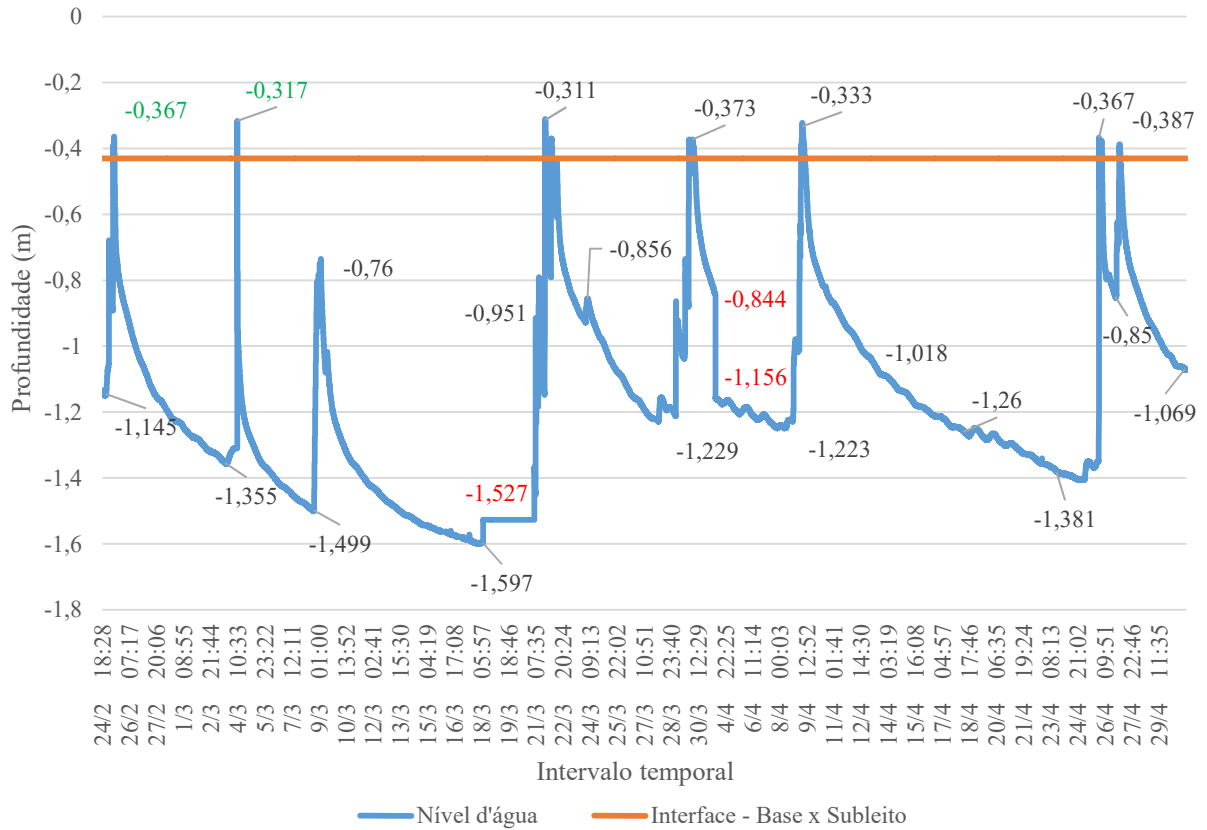
#### 4.5.3 Análises dos dados de precipitação e nível d'água

A terceira avaliação do desempenho hidráulico do pavimento, além da análise da permeabilidade e das simulações hidráulicas realizadas, consistiu em apreciar a totalidade dos dados de nível de água aferidos pelo medidor automático e armazenados pelo datalogger durante o período que ficou instalado no piezômetro de 24/02/2023 a 30/04/2023, e compará-los com os dados de precipitação obtidos da APAC (2023) para o posto pluviométrico localizado no bairro de Santo Amaro.

A análise comparativa dos dados buscou avaliar o comportamento do sistema de pavimentação permeável para a sequência de eventos naturais. A Figura 64 mostra todos os dados coletados no período, ou seja, todas as medições de nível d'água por minuto dentro do intervalo temporal analisado. Ratifica-se a necessidade de rotulação de apenas alguns valores no gráfico, devido

ao grande número de dados e a importância maior da visualização do comportamento.

**Figura 64 – Comportamento do sistema permeável – 24/02/2023 a 30/04/2023**



Fonte: Autor

É possível verificar através da análise dos dados, um comportamento relativamente cíclico de ascensão e rebaixamento do nível de água do sistema permeável, atingindo em 6 momentos níveis de água que se acumularam na camada de base do pavimento permeável por algum intervalo de tempo. Os dois primeiros foram justamente as duas simulações realizadas (destacados na cor verde na Figura 64) e os outros 4 em sequência ocorreram devido às precipitações naturais. Com isso, a avaliação de cada um desses quatro momentos foi desenvolvida.

Pontuam-se dois períodos de falhas nas medições em decorrência de sobreposição indevida de dados (destacados na cor vermelha na Figura 64). A primeira falha é aparente no gráfico com um platô horizontal com o nível d'água na profundidade 1,527m com a ausência de dados ocorrendo de 06:31h do dia 18/03 até 04:52h do dia 21/03; o platô ficou horizontal, pois após a falha, a medição se encontrava no mesmo nível. A segunda ausência de dados ocorreu de 11:10h do dia 31/03 até 08:08h do dia 04/04, marcada graficamente por um platô vertical, pois

a medição no início da falha era de 0,844m e no retorno da falha o nível estava mais rebaixado com valor de 1,156m. No entanto, mesmo perdendo o comportamento do sistema nesses dois períodos de falhas, isto não repercutiu negativamente nas análises realizadas.

Os dados de precipitações obtidos através da APAC (2023) permitiram avaliar as correlações com os quatro maiores picos de ascensão decorrentes de chuvas naturais. A Tabela 11 mostra os dados coletados diretamente da APAC (2023) com registros diários de precipitações em milímetros(mm), onde é possível observar que os picos têm relação direta com a intensidade pluviométrica local, três deles correlacionados com períodos de chuvas sucessivas (21 e 22 de março; 29 e 30 de março e 26 e 27 de abril) e outro com a maior chuva do período analisado que ocorreu em 09 de abril. Todas essas datas específicas estão destacadas na Tabela 11.

**Tabela 11 – Total diário de chuvas em milímetros (mm) – Posto pluviométrico em Santo Amaro**

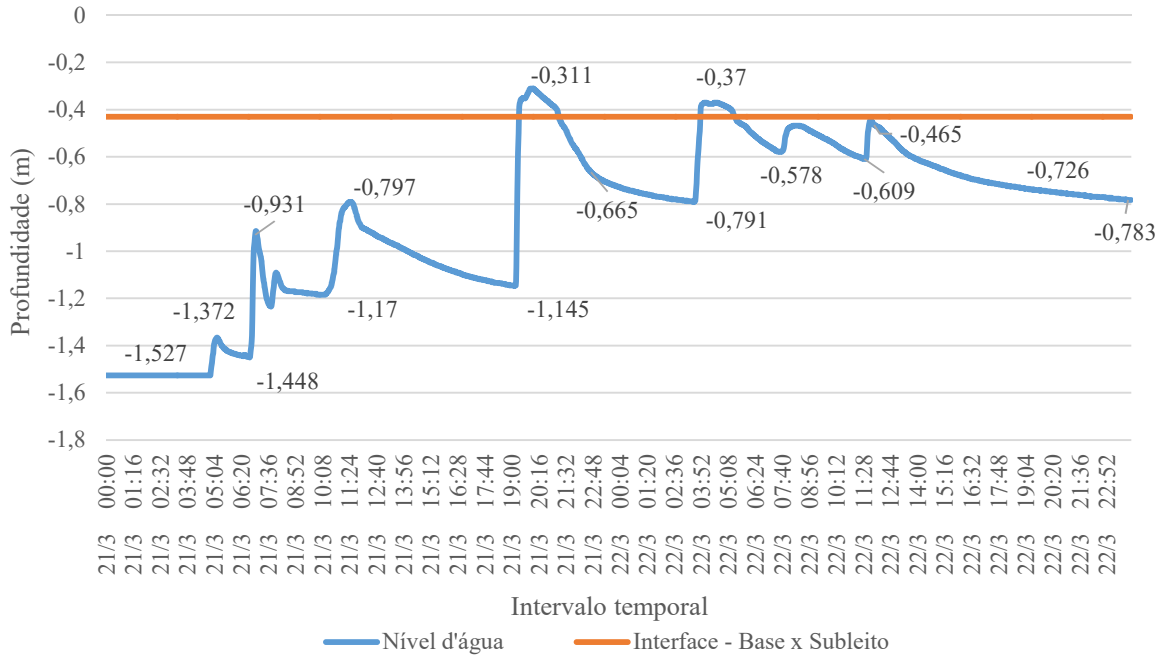
Posto pluviométrico - Recife (Codecipe / Santo Amaro) - Código 196																	
FEV/23	Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Precipitação (mm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Dia	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
MAR/23	Precipitação (mm)	-	-	-	-	-	-	-	1,1	19	15,1	0	0	-	-	-	-
	Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Precipitação (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	3,2	0	0	0	0	5,1	0	0
ABR/23	Dia	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
	Precipitação (mm)	0	0	1	0	12,2	63	11	5,3	3,2	5	0	0	20	45	0	0
	Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ABR/23	Precipitação (mm)	0	0	0	0	2,4	0	1	1	76	4,6	0	0	0	0,2	2,4	0,4
	Dia	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
	Precipitação (mm)	6,6	0	0	0,4	0,2	0	0	17,2	12	31,2	22	0	0	2,3	-	-

Fonte: APAC (2023)

As Figuras 65, 66, 67 e 68, representam os gráficos dos picos ascendentes verificados. De forma similar ao que ocorreu nas simulações de lâminas superficiais de chuvas intensas, o pavimento permeável obteve um bom desempenho hidráulico relativo à infiltração e recuperação para chuvas sucessivas, não tão intensas quanto as lâminas superficiais simuladas, mas ocorrendo espaçadas e distribuídas em um período de tempo maior.

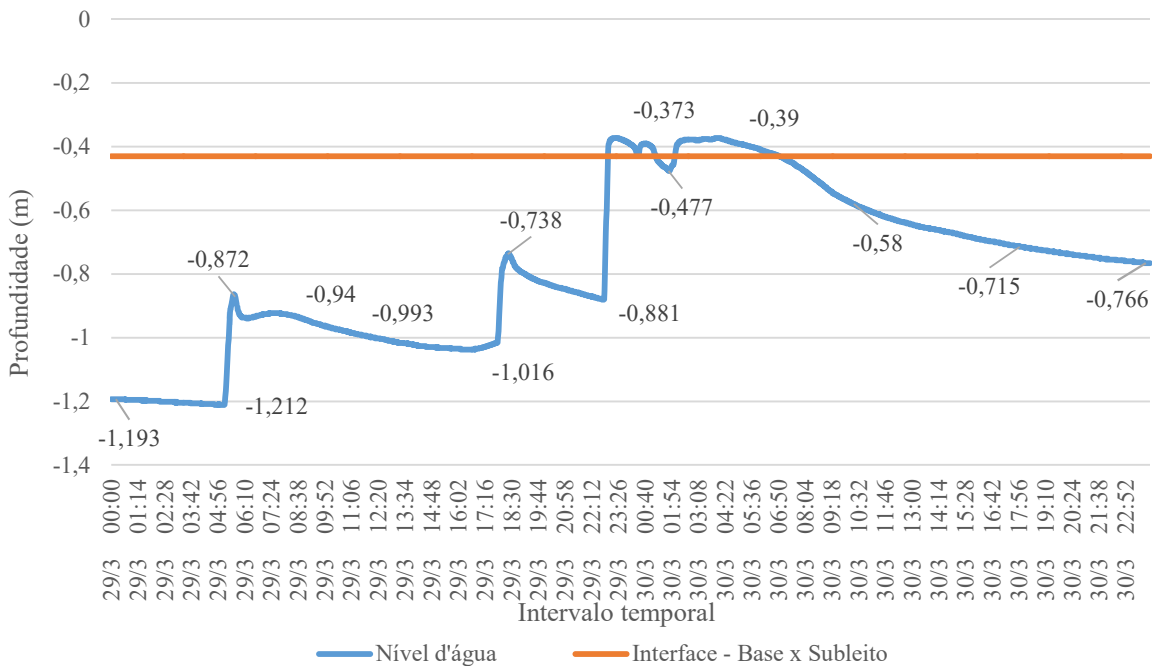
Sabendo que 1mm de chuva representa 1 litro em 1m<sup>2</sup> de área e considerando a área experimental de 27m<sup>2</sup> (pontuando que a área permeável executada é maior, mas não foi objeto deste estudo), foi possível estimar o volume que o pavimento permeável experimental deteve em cada um dos quatro eventos naturais, pois não houve extravasamento de volume de água.

**Figura 65 – Comportamento do sistema permeável – 21/03/2023 a 22/03/2023**



Fonte: Autor

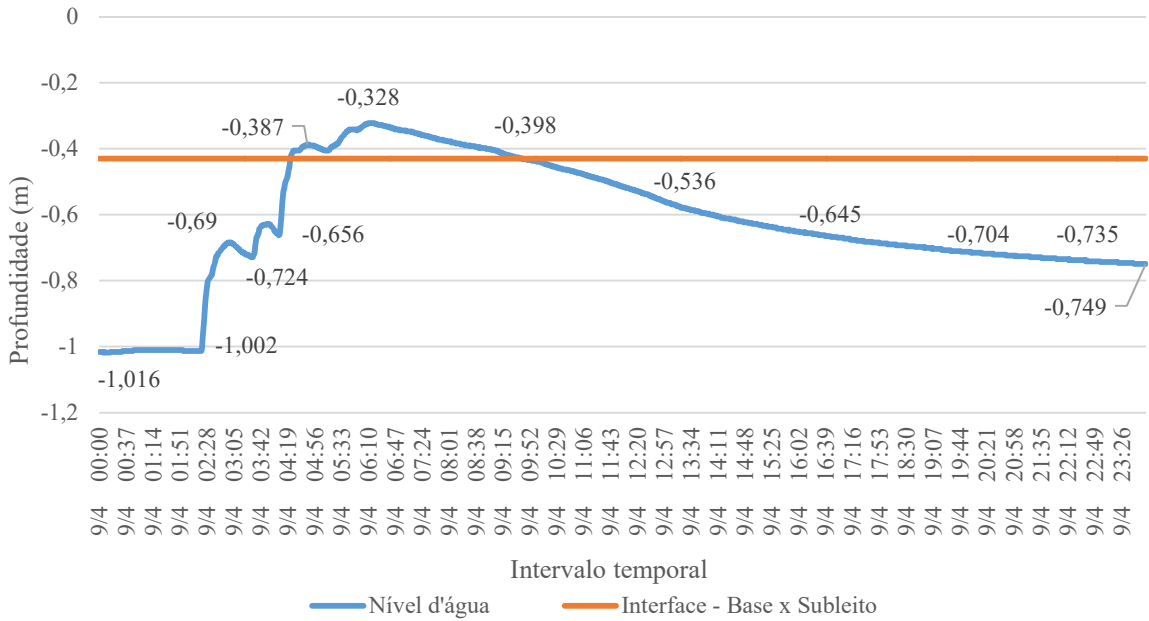
**Figura 66 – Comportamento do sistema permeável – 29/03/2023 a 30/03/2023**



Fonte: Autor

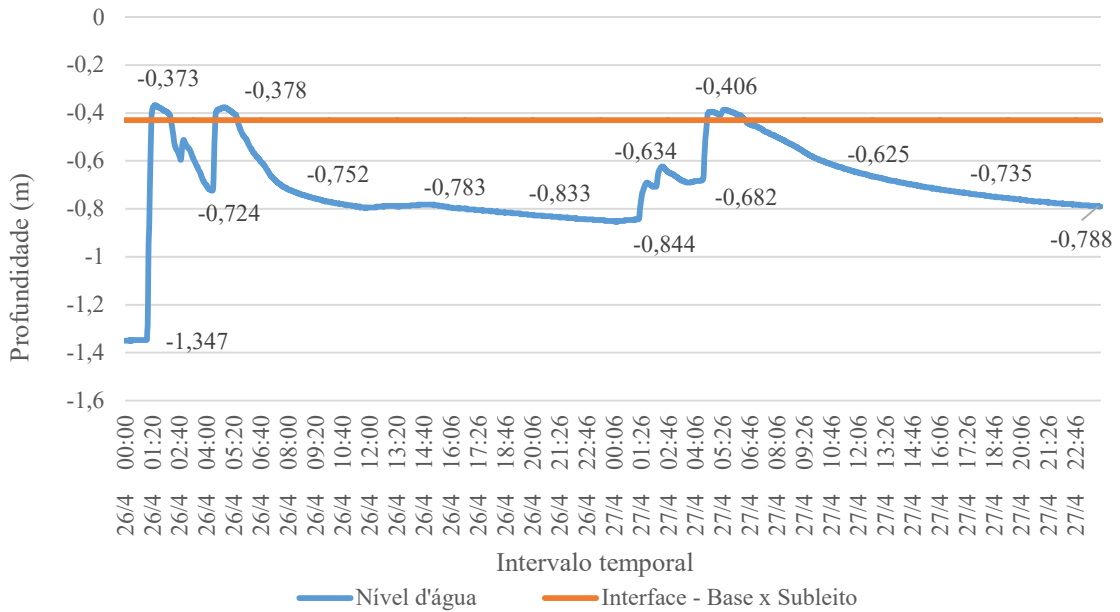
Para os dias 21 e 22 de março a medição de chuvas foi de 75,2mm (Tabela 11). Com este valor e com a área dos 27m<sup>2</sup>, estima-se que o volume de água que o pavimento permeável conseguiu captar e infiltrar foi de 2,03m<sup>3</sup> (2030 litros). Para os dias 29 e 30 de março o acumulado de chuvas foi de 65mm (Tabela 11) com detenção de volume de água estimado em 1,75m<sup>3</sup>.

**Figura 67 – Comportamento do sistema permeável – 09/04/2023**



Fonte: Autor

**Figura 68 – Comportamento do sistema permeável – 26/04/2023 a 27/04/2023**



Fonte: Autor

No dia 09 de abril, conforme a APAC (2023), a medição de chuva foi igual a 76mm (Tabela 11), resultando para a área experimental de pavimentação permeável um volume retido via infiltração de 2,05m³ para um único dia. Por fim, para os dias 26 e 27 de abril o acumulado registrado foi de 53,2mm (Tabela 11) e a estimativa de retenção do pavimento foi igual a 1,44 m³ de água pluvial. O pavimento permeável estudado apresenta-se de fato como uma técnica compensatória de infiltração capaz de reduzir os volumes escoados.

É possível destacar que o comportamento do sistema permeável para as chuvas reais mostrou-se similar às simulações hidráulicas. Existe uma ascensão do nível quando há entrada de volume de água, e em contrapartida, ocorre um rebaixamento quando o sistema está em recuperação da chuva recebida. Diferentemente das simulações que por causa do alto volume de água em um curto intervalo de tempo tinha-se uma rápida ascensão e depois uma recuperação contínua, nas chuvas reais que vão se distribuindo ao longo do tempo é possível identificar, avaliando os 4 gráficos, vários movimentos de subida e descida do nível de água, mas sempre com o sistema permeável respondendo satisfatoriamente a cada nova necessidade de recebimento de águas pluviais, ratificando o seu bom desempenho hidráulico.

#### **4.6 Considerações sobre a execução e manutenção do pavimento permeável**

A execução do pavimento permeável experimental e também no entorno onde o piso seguiu a mesma tipologia foi realizada por uma empresa responsável pela obra de reforma no campus da POLI-UPE. Algumas etapas do processo executivo encontram-se destacadas na Figura 69.

A Figura 69a mostra a colocação da brita para formação da camada de base do pavimento em 26/10/2022. A Figura 69b apresenta a colocação da manta e da camada de assentamento (28/10/2022) com aparente ausência de processo executivo e sem compactar a base no local. A Figura 69c indica o revestimento colocado no local, mas com diversos trinchos de blocos para serem colocados, em mais um indicativo de ausência de processos e programação, tendo em vista que a data da imagem é 20/12/2022. Por fim, a Figura 69d ilustra o pavimento finalizado e com a demarcação da área do pavimento experimental com fita zebra, apenas no dia 17/02/2022.

Algumas falhas executivas e de programação foram observadas durante o processo. A entrega final atrasou consideravelmente e o material utilizado para a camada de assentamento, conforme demonstrado nesse estudo, não foi o adequado. Quanto à execução em si, houveram falhas nas compactações da base e após a colocação dos blocos de revestimento, praticamente inexistindo esse importante processo de compactação. Esse fator associado a falhas na paginação do piso resultaram em irregularidades e desníveis visíveis no pavimento final.

Os fatores relatados somados à condição de resistência inferior ao que deveria dos blocos, verificado neste estudo, afetam a capacidade de resistência do sistema de pavimentação. Isto não deve repercutir no uso pelo motivo do tráfego previsto ser reduzido a apenas pedestres, mas provavelmente afetará a vida útil e durabilidade do piso executado, além do possível impacto

na mobilidade dos pedestres no uso do piso devido às irregularidades e desníveis.

**Figura 69 – Execução do pavimento permeável na POLI-UPE. Distribuição da brita na camada de base (a), colocação da manta e da camada de assentamento (b), execução do revestimento (c), pavimento finalizado (d)**



Fonte: Autor

A Figura 70 apresenta algumas falhas visíveis do pavimento permeável, seja na execução ou na manutenção. A Figura 70a e a Figura 70b mostram desníveis e principalmente espaçamentos inadequados no revestimento do pavimento, podendo-se verificar, inclusive, a utilização de um bloco quebrado que foi substituído ao ser identificado, mas que estava presente no pavimento finalizado.

A Figura 70c mostra um processo de colmatção em uma das áreas, ou seja, o pavimento recém entregue já possui uma área colmatada devido ao uso indevido, porque antes da finalização essa área colmatada tinha proximidade com o solo natural que contém materiais finos previsto para uma jardineira e não se tinha o cuidado de uma simples varrição dos finos que iam para a superfície do pavimento. Similar ao relatado, a Figura 70d indica a ausência da atividade mais

simples de manutenção que é a varrição, permitindo o acúmulo de folhas secas que favorecem o processo de colmatção do pavimento permeável.

**Figura 70 – Defeitos observados no pavimento devido à execução ou manutenção. Desníveis (a), espaçamentos inadequados (b), processo de colmatção (c), ausência de varrição (d)**



Fonte: Autor

Por fim, apresenta-se na Figura 71 um comparativo da área antes e depois da execução do pavimento permeável.

**Figura 71 - Área de pavimentação permeável. Antes da execução (a) e após executado (b)**



Fonte: Autor



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do desenvolvimento deste estudo, os resultados obtidos através da metodologia proposta resultaram em conclusões em relação ao objetivo definido. Este consistiu em avaliar a viabilidade da utilização de um pavimento permeável experimental enquanto alternativa compensatória para a drenagem urbana. Foram avaliados o solo do subleito de suporte do pavimento, as camadas e os materiais que as compõem buscando analisar todo o sistema permeável e também realizar a avaliação do seu comportamento hidráulico.

A avaliação deste comportamento foi importante para encontrar respostas sobre o aumento dos volumes de água infiltrados em função do sistema permeável e o como ele respondeu às chuvas reais e às simuladas (através da simulação hidráulica de lâmina superficial). Sabendo que o aumento da água infiltrada acarreta uma redução do escoamento superficial direto e das vazões de pico, a execução de pavimentos permeáveis promovem a mitigação dos alagamentos urbanos.

Os resultados dos ensaios no subleito do pavimento permeável experimental estudado indicaram, para a profundidade de 0,45m analisada, um solo de boa qualidade para implantação de técnicas compensatórias de infiltração, em função da sua composição 80% arenosa com elevado índice de suporte califórnia para o suporte de cargas igual a 34% e com uma condição permeável favorável com o coeficiente de permeabilidade igual a  $6,38 \times 10^{-5}$  m/s, ratificada pelo ensaio de campo com o infiltrômetro de anel simples como um grau de permeabilidade médio.

Em relação aos componentes do pavimento permeável, o material da camada de base, uma brita 19mm, foi ensaiado para as propriedades indicadas na ABNT 16416 (2015) e obteve em todos os ensaios resultados conformes com a norma nacional de pavimentação permeável. Para a abrasão “Los Angeles” foi 28,81% (<40%); o material passante na peneira 0,075mm, 0,57% ( $\leq 2\%$ ); o índice de vazios, 42,77% ( $\geq 32\%$ ) e a distribuição granulométrica também apresentou conformidade com a norma.

O material utilizado na camada de revestimento foi um pó de brita, alertado aos responsáveis pela obra da não conformidade visível por ser mais fino do que deveria, mas foi utilizado. Nos ensaios, ele comprovou ser não conforme com nenhuma das propriedades indicadas na ABNT 16416 (2015), desde a distribuição granulométrica, passando pela abrasão “Los Angeles” não possível de ser realizada pelo não atendimento da condição mínima de granulometria do ensaio.

O material passante na peneira 0,075mm foi 5,84% (não  $\leq$  2%); a dimensão máxima característica, 4,75mm (não 9,5 mm) e o índice de vazios 27,89% (não  $\geq$  32%).

O revestimento em blocos permeáveis de concreto foi ensaiado e demonstrou baixa variação dimensional e ausência de defeitos no concreto e homogeneidade das peças. No entanto, a resistência à compressão média foi de 10,68MPa para os 24 blocos rompidos, valor abaixo do mínimo que deveriam atingir, 20MPa. Destaca-se que a não conformidade de resistência do revestimento e também do material da camada de assentamento não indicaram repercussões no uso do pavimento, mas é ressaltado que o período de observação foi curto, pouco mais de 2 meses de fevereiro à abril de 2023, em decorrência dos grandes atrasos para a entrega da obra, sendo importante uma análise desses aspectos por um período de observação maior.

Quanto ao desempenho hidráulico do pavimento permeável experimental, o seu coeficiente de permeabilidade recém construído foi de  $3,26 \times 10^{-3}$  m/s indicando um alto valor, e para todas as medições realizadas, o valor encontrado foi superior ao limite normativo de  $10^{-3}$  m/s para o recém construído. Associado a esta avaliação, o desempenho hidráulico do pavimento foi definido como bom após a realização de duas simulações hidráulicas de lâminas superficiais de chuvas intensas e das análises do comportamento do nível de água no sistema permeável durante pouco mais de 2 meses com medições por minuto e observação da resposta permeável do pavimento para todos os eventos chuvosos do período. Avaliou-se então o comportamento do sistema tanto para chuvas curtas e intensas (lâminas simuladas hidraulicamente), quanto para chuvas reais distribuídas em um tempo maior, mas de forma sucessiva.

As simulações hidráulicas induziram lâminas de precipitações de 121,95mm e 211,64mm, para condições diferentes de saturação e umidade do solo, e o pavimento permeável respondeu positivamente durante os ensaios e seus altos volumes de água e também na recuperação para a condição prévia à realização das simulações. Nas análises dos outros picos de ascensão do nível de água decorrentes de precipitações foi ratificado o comportamento e a resposta satisfatória do pavimento, conseguindo infiltrar volumes de água em torno de 2000 litros, seja para dias sucessivos de precipitação ou para um dia de chuva mais intensa. Salienta-se, inclusive, que esta capacidade de infiltração em torno de  $2\text{m}^3$  não demonstrou ser a capacidade máxima do pavimento, sendo interessante o desenvolvimento de uma análise para este indicativo.

Dessa forma, a temática abordada é relevante para cidades urbanizadas com altas taxas de impermeabilização, como a cidade do Recife, pois apresenta um dispositivo que pode ser implantado visando ambientes mais sustentáveis e resilientes à água, destacando que, quanto maior o número de dispositivos sustentáveis executados, maiores são as reduções nos efeitos dos eventos pluviométricos extremos. O pavimento permeável experimental mostrou-se uma satisfatória técnica compensatória de infiltração, capaz de reduzir o escoamento superficial e os volumes escoados através da infiltração, com potencial real de mitigação dos alagamentos.

Para futuros trabalhos, sugerem-se alguns tópicos mediante o que foi desenvolvido e analisado nesta pesquisa:

- Avaliar se a não conformidade de resistência à compressão do revestimento e também do material utilizado na camada de assentamento tem repercussão negativa no pavimento;
- Determinar a capacidade máxima de volume de acumulação do pavimento permeável;
- Acompanhar com medições do coeficiente de permeabilidade, a manutenção ou perda de capacidade de infiltração do pavimento em relação aos valores encontrados no recém construído;
- Estudar o impacto do processo de colmatação no sistema de pavimentação permeável e discutir sobre o plano de manutenção necessário para que o pavimento mantenha seu bom desempenho hidráulico;
- Analisar separadamente o comportamento da camada de base e do sistema permeável completo, através da instalação de um piezômetro até a profundidade de 0,43m onde se encontra a interface base x subleito, para indicar resultados específicos do comportamento da camada reservatório do pavimento e como é a interação com o sistema permeável completo;
- Instalar um pluviômetro automático na área de estudo para que os dados de chuva reflitam com maior exatidão e distribuição temporal a realidade das precipitações no local do pavimento permeável;
- Definir uma forma de determinação contínua da umidade do solo, por faixas de profundidade, que permitam uma correlação mais precisa entre taxa de infiltração do sistema permeável e nível de umidade e saturação do solo;
- Realizar o acompanhamento do comportamento hidráulico do sistema por um período de observação maior.

## REFERÊNCIAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. **Curso de drenagem urbana com pavimentos permeáveis:** como projetar, executar e manter. Mariana Marchioni. São Paulo, 2021.

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland. **Projeto Técnico:** Pavimento Permeável. Soluções para cidades. 2013. Disponível em: [http://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/10/AF\\_Pav%20Permeavel\\_web.pdf](http://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/10/AF_Pav%20Permeavel_web.pdf). Acesso em: 11 Ago. 2022.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13292:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14545:** Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

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

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6457:** Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181:** Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: 2020.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7212:** Execução de concreto dosado em central - Procedimento. Rio de Janeiro: 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9781:** Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9895:** Solo - Índice de Suporte Califórnia (ISC) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 26:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro: 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: 2006.

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

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 51:** Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro: 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: 2003.

ACI – American Concrete Institute. **ACI 330R**: Guide for the Design and Construction of Concrete Parking Lots. Farmington Hills, Michigan, 2008.

ACI – American Concrete Institute. **ACI 522 R**: Report on Pervious Concrete. Farmington Hills, Michigan, 2010.

ACI – American Concrete Institute. **ACI 522.1**: Specification for Pervious Concrete Pavement. Farmington Hills, Michigan, 2013.

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 144 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS, 2005.

ALMEIDA, N. **Análise de viabilidade técnica para a utilização de resíduos de construção e demolição no subleito e na base de um pavimento em concreto permeável**. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Recife - PE, 2017.

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Monitoramento Pluviométrico**, 2023. Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>. Acesso em: 09 Mai. 2023.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D1196**: Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements. West Conshohocken, 1993.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D1429**: Standard Test Methods for Specific Gravity of Water and Brine. West Conshohocken, 2013.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D1557**: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>)). West Conshohocken, 2012.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D1883**: Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory Compacted Soils. West Conshohocken, 2014.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D2487**: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes. West Conshohocken, 2011.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D2844**: Standard Test Method for Resistance R-Value and Expansion Pressure of Compacted Soils. West Conshohocken, 2007.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D3385**: Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double Ring Infiltrometer. West Conshohocken, 2009.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D422**: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. West Conshohocken, 2007.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D4318**: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, 2010.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **D698**: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>). West Conshohocken, 2012.

BAPTISTA, M. ; NASCIMENTO, N. ; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 318 p. 2011.

BARROS, E. N. **Jardim de chuva**: técnica em manejo de águas pluviais urbanas, alternativa mitigatória de alagamentos no espaço interno da poli. 167 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Recife - PE, 2021.

BEZERRA, P. H. L. *et al.* Water Dynamics in an Infiltration Trench in an Urban Centre in Brazil: Monitoring and Modelling. **Water**, v. 14, n. 4, p. 513, 2022.

BORGWARDT, S. Long-term in-situ infiltration performance of permeable concrete block pavement. **In: Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Block Paving**. San Francisco, Califórnia, Estados Unidos. 2006.

CABRAL, J. J. DA S. P. **Urbanização e drenagem de Águas pluviais**. Notas de Aula. Março, 2022.

CABRAL, J. J. S. P.; ALENCAR, A.V. Recife e a Convivência com as Águas. **In: Hydroaid (Itália), PMSS/ Ministério das Cidades**. (Org.). Gestão do Território e Manejo Integrado das Águas Urbanas. Brasília: Ministério das Cidades, p. 111-130, 2005.

CEMADEN – Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Mapa Interativo – Estações Pluviométricas**, 2023. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>. Acesso em: 28 Fev. 2023.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPCÃO, R. S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde em Debate**, v. 43, n. spe3, p. 94-108, 2019.

**Ciclovivo**. Disponível em: <https://ciclovivo.com.br/arq-urb/urbanismo/nova-york-tera-9-000-jardins-de-chuva-nas-calcadas/>. Acesso em: 25 Ago. 2022.

COTRIM, G. **História Global 1**. 3 ed. São Paulo: Saraiva, 2016.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. 133 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2011.

DAMASCENO, B. C. **Habitação social e desenvolvimento urbano em cidades médias**. 1ª Ed. Bauru, SP: Canal 6, 2022.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 21, n. 12, p. 1516-1531, 2020.

ECOPLUIES. **Guide technique - recommandations pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain**. Programme Écotecnologies et Développement Durable - PRECODD. 2009.

**ECOTELHADO**. Disponível em: <https://ecotelhado.com/sistema/ecopavimento-4/>. Acesso em: 04 Ago. 2022.

Environmental Protection Agency, EPA. **National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Urban Areas**. EPA 841-B-05-004. United States, Office of Water, Washington, DC, 2005.

ESIG. Prefeitura do Recife – Secretaria de Mobilidade e Controle Urbano. **Informações geográficas do Recife**. Disponível em: <https://esigportal2.recife.pe.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=7f6ee791d4d94be4bcf1d0bb93a162a9>. Acesso em: 5 Set. 2022.

FERGUSON, B. **Porous Pavements**. Ed. 1. Flórida, Estados Unidos: CRC Press. 2005.

FERREIRA, T. S.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R. B.; Controle de enchentes no lote por poço de infiltração de água pluvial sob nova concepção. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**. v. 23, n. 03, p. 437-446. 2018.

FLETCHER, T. D. *et al.* SUDS, LID, BMPs, WSUD and more–The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban water journal**, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015.

GAO, C.; LIU, J.; ZHU, J.; WANG, Z. W. Review of current research on urban low-impact development practices. **Research Journal of Chemistry and Environment**, v. 17, n. S1, p. 209-214, 2013.

GUSMÃO, A. D. **Perfil geotécnico do terreno da Escola Politécnica de Pernambuco**. (acervo pessoal) Alexandre Duarte Gusmão. Recife, 2015.

HAMMES, G. **Estudo do desempenho mecânico de uma mistura asfáltica drenante produzida com ligante altamente modificado**. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis - SC, 2022.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/9662-censo-demografico-2010.html>. Acesso em: 25 Ago. 2022.

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

JANUSZKIEWICZ, K.; GOLEBIEWSKI, J. "Water Sensitive City" Within City as A Strategy for Activate Polluted Urban Areas. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 471, n.10, 2019.

**Jornal do Comércio.** Disponível em:

<https://jc.ne10.uol.com.br/pernambuco/2021/10/13020729-rio-beberibe-que-corta-recife-e-olinda-agoniza-ha-anos-enquanto-moradores-lutam-por-sobrevivencia.html>. Acesso em: 05 Abr. 2022.

KNAPPENBERGER, T.; JAYAKARAN, A. D.; STARK, J. D.; HINMAN, C. H. Monitoring porous asphalt stormwater infiltration and outflow. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 143, n. 8, 2017.

LEAL, C. E. F.; BARRETO, D.; NETO, J. DA C. M. Análise do Uso de Pavimento Intertravado Permeável como Dispositivo de Retenção de Água Pluvial: Estudo de Caso de São José do Rio Preto-SP. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 49794-49808, 2021.

MARCHIONI, M. **Porous surfaces for permeable pavement: clogging and filtration mechanisms.** 158 p. Tese (Doutorado) - Politécnico de Milão, Itália, 2018.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Pavimento Intertravado Permeável - Melhores Práticas.** Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), São Paulo, 24 p. 2011.

MEDEIROS, M. C. S. **Análise da percepção de riscos de populações vulneráveis urbanas: estudo de caso no bairro São José, João Pessoa-PB.** 204 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

MELO, T. DOS A. T. DE. **Jardim de chuva: Sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas.** 137 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife- PE, 2011.

MELO, T. DOS A. T. DE; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. DA S. P.; CIRILO, J. A.; ANTONINO, A. C. D. Desafios para o manejo das águas pluviais na cidade do Recife – A contribuição da UFPE. **In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Bento Gonçalves (RS)**, 2013.

NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B.. Capítulo 4 - Técnicas Compensatórias em Águas Pluviais. Em: RIGHETTO, A. M. (org.) **Volume 4 - Manejo de Águas Pluviais Urbanas.** Programa de Pesquisas em Saneamento Básico - PROSAB, p. 149 - 197, 2009.

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

NYC DEP. New York City Department of Environmental Protection. **Rain Garden Stewardship program – Maintenance Manual.** New York: Environmental Protection. 2019.

OLIVEIRA, R. L. M. **Alternativas compensatórias para drenagem urbana em ponto crítico da cidade de Recife-PE.** 95 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Recife - PE, 2017.

ONU. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.** New York: United Nations. 2019.



PAIXÃO, C. C. DA; VIEIRA, A. P DE. S. D.; MALUTTA, S. Medidas estruturais e não estruturais de drenagem urbana em Paranaguá/PR Structural and not structural methods implanted to contain floods in Paranaguá/PR. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 28728-28748, 2022.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho de Pavimentos Permeáveis como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano**. 283 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

POLETO, C. SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems): Uma Contextualização Histórica. **Revista Thema**, v. 8, n. 1, 2011.

PROKEŠOVÁ, R.; HORÁČKOVÁ, Š.; SNOPKOVÁ, Z. Surface runoff response to long-term land use changes: Spatial rearrangement of runoff-generating areas reveals a shift in flash flood drivers. **Science of The Total Environment**, v. 815, p. 151591, 2022.

QIAO, X.; LIAO, K.; RANDRUP, T. B. Sustainable stormwater management: A qualitative case study of the Sponge City initiative in China. **Sustainable Cities and Society**, 53, 2020.

RECIFE. **Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade de Recife**. Recife: 2015.

ROSO, M.; OLIVEIRA, T. D. DE; BEUTER, N. C. Por que verticalizar? Um estudo sobre o processo de verticalização nas cidades. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, p. e250101724737-e250101724737, 2021.

ROWE, A. A.; BORST, M.; CONNOR, T. P.; STANDER, E.K. Permeable pavement demonstration at the Edison Environmental Center. **In: Low Impact Development 2010: Redefining Water in the City**. p. 139-151, 2010.

SANSALONE, J.; KUANG, X.; YING, G.; RANIERI, V. Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage. **Water Research**. v.46, n.20, p. 6763-6774, 2012.

SCHREIBER, K. V. Best Management Practices as an Alternative Approach for Urban Flood Control. **In: Flood Handbook**. CRC Press, 2022. p. 53-76.

SENÇO, DE W. **Manual de técnicas de pavimentação: Volume 1**. São Paulo, Pini, 2ª ed. 2007.

SHANG, Y. *et al.* Comparison of the Engineering Strategies for Low Impact Development in a Densely Populated Old Urban Area. **Water**, v. 14, n. 7, p. 1149, 2022.

SILVA JUNIOR, M. A. B.; CABRAL, J. J. DA S. P.; FONSECA NETO, G. C.; GUERRA, C. M. F.; SILVA, S. R. Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.5, n.3, p. 302–318, 2020.

SILVA, A. K. B. **Análise do desempenho de estruturas de pavimentos permeáveis implantadas no estacionamento da Escola Politécnica (POLI-UPE)**. 172 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Recife - PE, 2022.

SILVA, J. F. F. **Alternativas para controle de alagamentos urbanos utilizando telhados verdes e pavimentos permeáveis em um bairro da cidade do Recife**. 114 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru - PE, 2019.

SOUZA, V.C.B.; GOLDEFUM, J.A. Trincheira de infiltração como elemento de controle do escoamento superficial: um estudo experimental. **In: XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, 11 p. 1999.

TANG Y.; CHAN, F.K.S.; O'DONNELL, E.C.; GRIFFITHS, J. Aligning ancient and modern approaches to sustainable urban water management in China: Ningbo as a “Blue-Green City” in the “Sponge City” campaign. **J Flood Risk Management**, 11, 2018.

**TRUEGRIDPAVER**. Disponível em: <https://www.truegridpaver.com/products/>. Acesso em: 04 Ago. 2022.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**. v. 22, n.63, p. 97- 112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 2, n.2, p. 5- 12, 1997.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4ª Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRHidro, 2009.

**USP Imagens**. Fotógrafo: Marcos Santos. Disponível em: <https://imagens.usp.br/escolas-faculdades-e-institutos-categorias/escola-politecnica-institutos-faculdades-e-escolas/asfalto-poroso/attachment/asfaltoporoso001/>. Acesso em: 11 Ago. 2022.

VAN ROON, M.; VAN ROON, H. **Low impact urban design and development: the big picture - An introduction to LIUDD principles and methods framework**. Lincoln, Nova Zelândia: Manaaki Whenua Press, 64 p., 2009.

VASCONCELLOS, M.; DA P. C.; RODRIGUES, J. A fotografia como instrumento do trabalho do higienista (São Paulo, primeira metade do século XX). **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, v. 13, n. 2, pp. 477-491, 2006.

VIRGILLIS, A. L. C. DE. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 191 p. (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo - SP, 2009.

WEISS, P. T.; KAYHANIAN, M.; GULLIVER, J. S.; KHAZANOVICH, L. Permeable pavement in northern North American urban areas: research review and knowledge gaps. **International Journal of Pavement Engineering**, v.20, n.2, p. 143–162, 2019.

**WORLD POPULATION REVIEW**. Disponível em: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/most-urbanized-countries>. Acesso em: 27 Fev. 2022.

XIE, N.; AKIN, M.; SHI, X. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**. v. 210, p. 1605-1621, 2019.