



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

**CONCRETOS PERMEÁVEIS NA AMAZÔNIA: DESAFIOS E  
POTENCIALIDADES REGIONAIS.**

**Nállyton Tiago De Sales Braga**

BELÉM – PA

2019

**NÁLLYTON TIAGO DE SALES BRAGA**

**CONCRETOS PERMEÁVEIS NA AMAZÔNIA: DESAFIOS E  
POTENCIALIDADES REGIONAIS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Linha de Pesquisa: Tecnologias Construtivas, Conservação e Restauro

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

**NÁLLYTON TIAGO DE SALES BRAGA**

**CONCRETOS PERMEÁVEIS NA AMAZÔNIA: DESAFIOS E  
POTENCIALIDADES REGIONAIS**

Belém, 11 de dezembro de 2019.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro (orientadora)  
Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Pará

---

Prof.<sup>o</sup> Dr. Juliano Pamplona Ximenes – Membro Interno  
Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Pará

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Germana Menescal Bittencourt – Membro Externo  
Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal do Pará

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Risete Maria Queiroz Leao Braga – Membro Externo  
Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal do Pará

---

Prof.<sup>o</sup> Dr. Abraão Bernardo Rohden – Membro Externo  
Fundação Universidade Regional de Blumenau

## AGRADECIMENTOS

Gosto de pensar que as coisas sempre acabarão bem, e do jeito que deve ser. São essas imagens positivas que dão o fôlego de cada manhã, e ajudam a levantar, a continuar, e dão certa tranquilidade, mesmo nos dias mais desastrosos. No último ano e meio, houve um bocado de dias assim, e pelos quais foi possível passar somente porque eu pude – e fui ajudado a - acreditar que eles passariam. Gostaria de agradecer a quem me suportou no desespero, no cansaço, na tristeza, na falta de fé. Obrigado pelos conselhos, recomendações, dicas de vida, ou simplesmente por terem me ouvido praguejar transtornado. Obrigado, de coração.

Agradeço à professora Luciana Cordeiro pela orientação, e por ter acreditado na potencialidade do projeto. Obrigado aos professores Márcio Barata, Germana Menescal, Juliano Ximenes e Rodrigo Rodrigues, pelas dicas relevantes e pela paciência. Obrigado aos amigos de mestrado Lucimara Leal, Christianne de Jesus e Euller Arruda. Ao amigo de muito tempo Paulo Chagas, por toda contribuição, por compartilhar sonhos e *eureka*s. Aos amigos Thaís Silva e Jayme Ribeiro, pela ajuda direta no projeto e pela amizade. Aos amigos que o intercâmbio me deixou, Rafael, Luiz e Renan, por me ajudarem a rir semanalmente dos problemas e da vida. À Carol, pela ajuda com a estatística, e sempre pela amizade. Agradeço ao tio Eduardo e à minha avó, pela paciência. Agradeço à minha mãe e aos meus irmãos por estarem, mais do que nunca, presentes, e por me ouvirem e acreditarem que eu possa ser alguém melhor. Obrigado à Mariana, pela presença, e pela companhia, e por acreditar e embarcar nos desafios da vida junto comigo.

Agora, quero acreditar que a homeostase da vida está nos encaminhando a algo positivo, e que os novos desafios trarão consigo a carga de terem vindo na hora certa, em momento oportuno, e que meu crescimento pessoal e profissional me ajudará a estar à frente e acima do que for negativo. O plano é ir mais, fazer melhor, sonhar maior. De resto, as coisas vão aos poucos se organizando, e vai dar certo.

## RESUMO

O crescimento das cidades agrega diversos problemas associados à impermeabilização do solo, modificação dos cursos naturais de rios e aceleração do escoamento de águas superficiais através de condutos e canais que, por sua vez, potencializam riscos de enchentes e inundações. Cresce, desse modo, a demanda por propostas de drenagem de águas superficiais sustentáveis e resilientes, que tem como objetivo minimizar os impactos negativos do avanço urbano desordenado sobre o ciclo da água. Pavimentos de concreto permeável destacam-se, nesse contexto, como uma medida eficiente e sustentável para minimizar a vazão superficial e reduzir riscos de enchentes. O programa experimental desse trabalho teve como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica de concretos permeáveis de seixo de cava para uso em regiões com intenso regime pluviométrico. Foram estabelecidas como variáveis de controle 2 combinações de agregado graúdo, 3 teores de pasta de cimento e 3 variações de relação água/cimento, totalizando 18 combinações. As amostras foram testadas quanto à coesão entre pasta de cimento e agregados, massa específica, teor de ar incorporado, permeabilidade, porosidade e resistência à tração na flexão. Além disso, foram realizados testes para caracterização de poros superficiais quanto ao tamanho e distribuição, através de método de Processamento Digital de Imagens (PDI). Foi idealizado e realizado, ainda, procedimento experimental para avaliação do desempenho das amostras submetidas a intensos e repetitivos fenômenos pluviométricos. Por último, foi feita estimativa para avaliação do potencial uso de pavimentos permeáveis de concreto em substituição a coberturas convencionais de calçadas e vias para tráfego de veículos. Dentre os resultados, destaca-se a massa específica como o parâmetro que apresentou maior correlação linear com o comportamento mecânico ( $r$  de Pearson = 0.71) e hidráulico das amostras ( $r$  de Pearson = -0.87). Além disso, verificou-se, através de análise de variância ANOVA com intervalo de confiança de 95%, que a granulometria e a relação a/c foram os dois fatores mais relevantes sobre as propriedades dos materiais. Observou-se, ainda, que o escoamento superficial apresentou correlação linear negativa moderada ( $r$  de Pearson = -0.65) com o tamanho médio dos poros superficiais. Verificou-se, finalmente, que a substituição de 50% de calçadas impermeáveis por coberturas de concreto permeável apresentam redução de vazão superficial de até 8%. A substituição de coberturas impermeáveis de asfalto, por sua vez, possibilita a redução de vazão de 7.7% (para 10% de substituição) a 38.6% (para 50% de substituição), o que evidencia a potencialidade de tal tecnologia para apaziguar problemas relacionados a enchentes, mesmo em regiões com elevado índice pluviométrico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Concreto permeável; granulometria; relação a/c; chuvas intensas; escoamento superficial.

## ABSTRACT

The growth of cities increases several problems associated with soil sealing, modification of natural watercourses and acceleration of surface water flow through conduits and drainage channels, which, in turn, improves the risk of flooding. There is a growing demand for sustainable and resilient surface water drainage proposals, which aim to minimize the negative impacts of the disorderly urban development on the water cycle. Pervious concrete pavements stand out in this context as an efficient and sustainable measure to minimize surface flow and reduce flood risks. The experimental program of this study had as main objective to evaluate the technical viability of pervious concretes for use in regions with intense rainfall. Control variables were 2 coarse aggregate combinations; 3 cement paste contents; and 3 water/cement ratio variations, totaling 18 combinations. The samples were tested for cohesion between cement paste and aggregates, specific mass, incorporated air content, permeability, porosity and flexural tensile strength. In addition, tests were performed to characterize surface pores regarding size and distribution, using the Digital Image Processing (DIP) method. An experimental procedure was also designed and performed to evaluate the behavior of samples submitted to intense and repetitive rainfall phenomena. Finally, an estimate was made to evaluate the potential use of pervious concrete pavements as a substitute for conventional sidewalk and road traffic coverage. Among the results, the specific mass stands out as the parameter that presented the highest linear correlation with the mechanical (Pearson  $r = 0.71$ ) and hydraulic behavior of the samples (Pearson  $r = -0.87$ ). In addition, it was found, through analysis of variance ANOVA, that the particle size and the ratio w/c were the two most relevant factors on the properties of materials. It was also observed that the run-off coefficient presented moderate negative linear correlation (Pearson  $r = -0.65$ ) with the average surface pore size. Finally, it was found that the replacement of 50% of impermeable sidewalks with pervious concrete roofs has a surface flow reduction of up to 8%. The replacement of waterproof asphalt covers, in turn, allows the flow reduction from 7.7% (for 10% replacement) to 38.6% (for 50% replacement), which shows the potentiality of such technology to solve problems related to flooding, even in regions with high rainfall.

**KEYWORDS:** Pervious concrete; granulometry; w/c ratio; heavy rain; surface run-off.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Componentes da Cidade Resiliente.	21
Figura 1.2 – Fases de controle de enchentes em meios urbanos.	22
Figura 1.3.A) – Pontos de alagamento identificados em estudo de 2013. B) Pontos de alagamento identificados em estudo de 2017.	23
Figura 2.1 - Processo de redução da permeabilidade de superfícies pela urbanização das cidades.	28
Figura 2.2 - Biovaletas como mecanismo de retenção de águas superficiais, redução da velocidade e aumento do tempo de escoamento.	30
Figura 2.3 - Exemplo de configuração de Pavimento permeável.	32
Figura 2.4–Tipos de sistemas drenantes.	38
Figura 2.5 - Vazios na matriz de concreto permeável.	43
Figura 2.6 – Histograma de coeficientes de permeabilidade.	46
Figura 2.7 - Resultados máximos de resistência à tração na flexão na bibliografia consultada, em MPa.	48
Figura 2.8 -a) Amostra de concreto com descolamento superficial e baixo teor de pasta (esquerda); b) e amostra com elevado teor de pasta, ocasionando efeito-parede	50
Figura 2.9 - Exemplo de agrupamento em esferas de mesmo diâmetro, semelhante à organização de estruturas cristalinas do tipo CFC.	51
Figura 2.10 - Efeito de afastamento entre os grãos da classe dominante.	52
Figura 2.11 - Fenômeno de efeito-parede em torno de um grão da classe dominante.	53
Figura 3.1 – Programa experimental.	57
Figura 3.2 - Relações granulométricas adotadas. (a): Empacotamento de quatro grãos dominantes para cada grão secundário, centralizado. 5.2(b): Empacotamento	60
Figura 3.3 – Planilha excel para determinação de compacidade.	61
Figura 3.4 – Ordem de mistura.	63
Figura 3.5 – Jogo de moldes e trilho.	63

Figura 3.6 – Teste de resistência à tração na flexão.	64
Figura 3.7 - Exemplo de tratamento de imagens: (A) Registro fotográfico; (B) Configuração para 8 - bit; (C) Caracterização de poros.	66
Figura 3.8 – Vista frontal e lateral do dispositivo de chuva.	67
Figura 3.9 – Configuração do dispositivo de chuva.	67
Figura 3.10 – Sistema de simulação de chuvas: Distribuição de furos nas conexões que simulam chuvas intensas.	69
Figura 3.11 – Delineamento da terceira etapa	70
Figura 3.12 – Região de análise.	71
Figura 4.1 – Massa específica e teor de ar incorporado.	78
Figura 4.2 – Relação entre massa específica teórica e massa específica experimental.	79
Figura 4.3 – Teste de permeabilidade em placa de concreto permeável.	80
Figura 4.4 – Coeficiente de permeabilidade das amostras.	81
Figura 4.5 – Relação entre coeficiente de permeabilidade $k$ e massa específica experimental.	82
Figura 4.6 – Relação entre permeabilidade e relação $a/c$ para cada faixa de teor de pasta no primeiro grupo granulométrico.	83
Figura 4.7 – Relação entre permeabilidade e relação $a/c$ para cada faixa de teor de pasta no segundo grupo granulométrico.	84
Figura 4.8 – Resistência à tração na flexão nos dois grupos granulométricos.	85
Figura 4.9 – Relação entre resistência à tração na flexão e massa específica experimental.	86
Figura 4.10 – Relação entre resistência à tração na flexão e relação $a/c$ para cada faixa de teor de pasta no primeiro grupo granulométrico.	87
Figura 4.11 – Relação entre resistência à tração na flexão e relação $a/c$ para cada faixa de teor de pasta no segundo grupo granulométrico.	87
Figura 4.12 – Diagrama de extremos e quartis para porosidade total.	89
Figura 4.13 – Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a porosidade efetiva.	93

Figura 4.14 – Nichos impermeáveis dentro das amostras de concreto permeável.	91
Figura 4.15 – Relação entre massa específica e tortuosidade.	93
Figura 4.16 – Relação entre volume retido e número de chuvas intensas aplicadas.	99
Figura 4.17 – Volume retido total em cada amostra.	100
Figura 4.18 – Relação entre o potencial de absorção e retenção de água e massa específica.	100
Figura 4.19 – Ocorrência de escoamento superficial.	101
Figura 4.20 – Registros do canal da 3 de maio.	105
Figura 4.21 – Mapa de declividade.	108
Figura 4.22 – Mapa hipsométrico.	108
Figura 4.23 - Mapa de uso e ocupação do solo.	109
Figura A.1 – Processo para definição de grau de esfericidade pelo método de PDI.	119
Figura A.2 – A) Compacidade para distribuição granulométrica 4.75/9.6 mm e 2.38/4.75; B) Compacidade para distribuição granulométrica 4.75/9.6 mm e	120

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros da 2ª etapa.	65
Quadro 2 - Variáveis de caracterização da microbacia.	73
Quadro 3 – Teste de coesão.	75
Quadro 4 – Coesão e cobrimento das misturas.	77
Quadro 5 – Fatores pertinentes para aplicação de concretos permeáveis.	104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos, granulometrias e proporções utilizadas.	41
Tabela 2 - Propriedade físicas e químicas do cimento CP II E 32.	58
Tabela 3 – Consumos de materiais por m <sup>3</sup> e percentuais e pasta e água nas misturas	62
Tabela 4 – Testes prévios para definição de vazão e declividade a serem adotadas no teste de definição do escoamento superficial.	67
Tabela 5 – Relação de poros conectados, fechados e totais.	88
Tabela 6 – Caracterização de poros internos.	92
Tabela 7 – Caracterização de poros superficiais.	94
Tabela 8 - ANOVA para definição de parâmetros de maior influência sobre resultados experimentais.	95
Tabela 9 – Grau de correlação linear entre as variáveis.	97
Tabela 10 – Correlação linear para os resultados obtidos no experimento de simulação de chuva.	102
Tabela 11 – Caracterização da microbacia de análise.	106
Tabela 12 – Distribuição de áreas na região analisada.	109

Tabela 13 – Estimativa de redução de vazão superficial a partir da substituição de calçadas por coberturas de concreto permeável.	112
Tabela 14 - Estimativa de redução de vazão superficial a partir da substituição de Vias de asfalto por coberturas de concreto permeável.	113
Tabela A.1 – Distribuição granulométrica do seixo de cava.	118
Tabela A.2 - Caracterização do agregado graúdo.	119
Tabela A.3 - Caracterização de combinações granulométricas.	121

## **ABREVIATURAS E SIGLAS**

LID	Low Impact Development
ACI	American Concrete Institute.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
RMB	Região Metropolitana de Belém.
NBR	Norma Brasileira.
PDAP	Plano Diretor de Águas Pluviais.
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio.
NM	Norma Mercosul.
ANOVA	Análise de Variância.
CP	Cimento Portland.
MEC	Método de Empacotamento Compressível.
CFC	Cúbico de Face Centrada.
PDI	Processamento Digital de Imagens
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
ANA	Agência Nacional das Águas

AMAE	Agência Reguladora de Água e Esgoto
SESAN	Secretaria Municipal de Saneamento
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ASTM	American Society for Testing and Materials

## SÍMBOLOS GERAIS

$a_{12}$	Coefficiente de afastamento de partículas da classe dominante
$b_{21}$	Coefficiente de ocorrência de efeito-parede
$\gamma_{ad}$	Massa específica do aditivo, equação de consumo de cimento
$\gamma_c$	Massa específica do cimento, equação de consumo de cimento
$\rho_b$	Peso da amostra
$\rho_t$	Massa específica teórica
A	Área de drenagem superficial
A1	Área de sessão da amostra, em mm <sup>2</sup> , equação para cálculo de coeficiente de permeabilidade
A2	Área de sessão interna do tubo de ensaio, em mm <sup>2</sup> , equação para cálculo de coeficiente de permeabilidade
C	Densidade de empacotamento/compacidade real
C	Coefficiente de escoamento superficial/coeficiente de deflúvio, equação racional para cálculo de vazão
Cc	Consumo de cimento
D	Diâmetro interno de cilindro para ensaio de compacidade
Dad	Dosagem do aditivo, equação de consumo de cimento

e	Índice de vazios
FC	Fator de compactação
h	Altura final de material compactado
hf	Altura final
hi	Altura inicial
I	Precipitação média
k	Coefficiente de permeabilidade
K	Índice de compactação
L	Comprimento de amostra, equação para cálculo de coeficiente de permeabilidade
M	Massa de material seco
p	Porosidade total
Pc	Relação cimento-agregados
Q	Vazão
t	Tempo
Vr	Percentual de vazios teóricos
w/c	Relação água/cimento
y	Fração volumétrica
$\beta$	Compacidade virtual da classe
$\gamma$	Compacidade virtual
$\pi$	Porosidade
$\rho$	Densidade

## UNIDADES

MPa	Mega pascal, unidade de pressão.
Mm	Milímetro, unidade de medida de comprimento.
M	Metro, unidade de medida de comprimento.
Kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico, unidade de massa específica.
L/m <sup>2</sup> /min	Litro por metro quadrado por minuto, unidade de vazão, taxa de percolação.
m/s	Metro por segundo, unidade de velocidade.
h/min	Hora por minuto, representação de tempo de pega.
KPa	Quilo pascal, unidade de pressão.
Cm	Centímetro, unidade de medida de comprimento.
Hab/ha	Habitante por hectare, unidade de densidade demográfica.
Mm/s	Milímetro por segundo, unidade de velocidade.
Kg/dm <sup>3</sup>	Quilograma por decímetro cúbico, unidade de massa específica.
L/m <sup>3</sup>	Litro por metro cúbico, representação do consumo de água por metro cúbico de concreto.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	JUSTIFICATIVA.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	25
1.2.1	OBJETIVO GERAL .....	25
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
1.3	APRESENTAÇÃO.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1	DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL .....	27
2.2	DRENAGEM URBANA EM BELÉM.....	33
2.3	CONCRETO PERMEÁVEL: PROPRIEDADES E APLICAÇÕES.....	35
2.4	COMPOSIÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL .....	39
2.5	POROSIDADE EM CONCRETOS PERMEÁVEIS.....	43
2.6	PERMEABILIDADE.....	44
2.7	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	47
2.8	GRAU DE EMPACOTAMENTO EM CONCRETOS PERMEÁVEIS.....	48
2.9	MÉTODO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL .....	51
2.10	MÉTODO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS PERMEÁVEIS.....	54
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	56
3.1	MATERIAIS.....	58
3.1.1	CIMENTO.....	58
3.1.2	AGREGADOS .....	58
3.1.3	ÁGUA .....	59
3.2	MÉTODO.....	59
3.2.1	ESTUDO DO EMPACOTAMENTO VIRTUAL.....	59
3.2.2	PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS PERMEÁVEIS COM SEIXO DE CAVA.....	62
3.2.3	POROSIDADE EFETIVA, TOTAL E ANÁLISE DE POROS POR PDI.....	65
3.2.4	SIMULAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS .....	66
3.2.5	ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO PERMEÁVEL DE SEIXO PARA REDUÇÃO DA VAZÃO SUPERFICIAL .....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	75

4.1	TESTE DE COESÃO.....	75
4.2	MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE AR NO ESTADO FRESCO .....	77
4.3	MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO ENDURECIDO .....	78
4.4	PERMEABILIDADE.....	80
4.5	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	84
4.6	ANÁLISE DE POROS.....	88
4.6.1	POROSIDADE EFETIVA E POROSIDADE TOTAL .....	88
4.6.2	ANÁLISE DE POROS INTERNOS POR MÉTODO DE PDI .....	91
4.6.3	ANÁLISE DE POROS SUPERFICIAIS POR MÉTODO DE PDI .....	93
4.7	CORRELAÇÕES E ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	95
4.8	SIMULAÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO SUBMETIDAS À AÇÃO DE CHUVAS INTENSAS .....	98
4.9	POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE COBERTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL EM MICROBACIA METROPOLITANA .....	104
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	115
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	118
7	ANEXOS .....	128
	ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS .....	128
	ANEXO B – REGISTROS DE PDI DE POROS INTERNOS.....	132
	ANEXO C - REGISTROS DE PDI DE POROS SUPERFICIAIS .....	135

## 1. INTRODUÇÃO

O planejamento e gerenciamento de sistemas de drenagem de águas superficiais compatíveis com a morfologia e a dinâmica ambiental, cultural e social das cidades é um dos grandes desafios para o desenvolvimento urbano sustentável. Crescem, nesse contexto, propostas de drenagem que tem como objetivo principal mimetizar condições ambientais similares aos períodos que antecederam processos de urbanização intensa e impermeabilização de coberturas naturais dos centros urbanizados.

A evolução da urbanização – desprovida de infraestrutura de saneamento e drenagem - agrega problemáticas relacionadas ao saneamento ambiental e à drenagem de águas superficiais, à medida em que acentua a impermeabilização e ocupação não regulamentada do solo, notadamente em áreas de favela das cidades. Segundo Santos (2017), em comentário sobre a ocupação urbana no município de Belém, por exemplo, “o rápido adensamento das baixada<sup>1</sup> agravou os casos de alagamentos e inundações devido à morfologia das ocupações irregulares em áreas de várzea [...], baixa permeabilidade de solo pós-ocupação e falta de políticas de saneamento na região”.

Ressalta-se, ainda, que mesmo em regiões onde o poder público age efetivamente e implementa infraestruturas de drenagem, estas apresentam como fundamento primordial o escoamento acelerado de águas superficiais através de condutos e canais para pontos mais afastados – é a chamada infraestrutura cinza ou tradicional ((DONG et al, 2017), o que pode ter como consequência a sobrecarga de bacias e potencialização de desastres ambientais, como inundações e alagamentos urbanos.

Tucci et al. (2002) abordam que em sistemas tradicionais a quantidade de água que solicita simultaneamente as estruturas de micro e macrodrenagem aumenta substancialmente conforme as superfícies são impermeabilizadas. Como consequência, fenômenos de inundações podem ocorrer com maior frequência do que quando as coberturas eram compostas por coberturas naturais, com capacidade de absorver parte da solicitação pluviométrica.

Se no passado a utilização de sistemas tradicionais para o escoamento de águas superficiais era visto como uma ação efetiva e funcional de engenharia, nas últimas décadas, a intensificação

---

<sup>1</sup> A autora opta pela denominação de assentamentos precários regional, “baixada”, mas o termo pode significar, concomitantemente, favela, sob denominação mais abrangente.

de problemas associados à elevada frequência de inundações e alagamentos, notadamente em grandes centros urbanos, despertou gestores públicos e a comunidade científica para a necessidade de que fossem desenvolvidas propostas de drenagem não somente para o escoamento eficiente de águas pluviais, mas que estas fossem ainda capazes de absorver, ao mesmo tempo, o aumento da urbanização e da poluição, o crescimento populacional e a iminência das mudanças climáticas globais.

Discutem-se, notadamente nos últimos 10 anos, não somente soluções efetivas para apaziguar focos de inundações nas cidades, mas propostas de infraestrutura de drenagem que sejam sustentáveis e resilientes – funcionais agora e adaptáveis a um futuro incerto (DONG et al, 2017). O conceito de resiliência aplicado à adaptabilidade dos centros urbanizados a desastres ambientais, por sua vez, modifica o princípio de planejar e construir infraestruturas urbanas: devem ser propostas tecnologias e sistemas que sejam não mais “à prova de falhas”, mas que possam “falhar com segurança” – ou no original: *from fail-safe to safe-to-fail* (AHERN, 2011; BUTLER et al., 2014).

No âmbito da drenagem urbana sustentável, intensificam-se propostas e estudos voltados à utilização de tecnologias ditas compensatórias (em inglês, *Low Impact Development – LID*), que buscam minimizar os efeitos adversos do avanço urbano sobre o ciclo da água através de práticas de gestão de água efetivas e sustentáveis (AHIABLAME, ENGEL, e CHAUBEY, 2012). As práticas LID apontam para o manejo de águas pluviais de maneira descentralizada e em menor escala e são, portanto, menos agressivas ao meio ambiente.

A utilização e aplicação de pavimentos permeáveis em sistemas de drenagem é classificada como uma LID e pode ser uma alternativa de drenagem de águas superficiais, pois o uso dessa tecnologia tem como objetivo fundamental mimetizar a condição inicial do escoamento de águas pluviais, antes do avanço da urbanização e impermeabilização dos solos (CORMIER e PELLEGRINO, 2008).

Sistemas de pavimentos permeáveis são conhecidos por ser uma medida de controle de origem eficaz, e são utilizados para atenuar os efeitos adversos do escoamento de águas pluviais em regiões densamente urbanizadas, tais como aumento volume de escoamento e deterioração da qualidade da água receptora (JABUR, 2015). Destacam-se ainda diversas vantagens dessa tecnologia, em comparação com as propostas amplamente utilizadas na maioria das cidades brasileiras, como a atenuação do ruído de tráfego e do calor irradiante em microclimas urbanos impermeáveis, e a possibilidade de armazenamento e filtragem de águas pluviais (ACI 522R-10 2010).

O pavimento permeável recebe destaque na normatização americana ACI 522R-10 (2010) como uma das melhores práticas de gestão de águas pluviais. Trata-se de uma tecnologia sustentável do ponto de vista de redução de vazão à jusante nas bacias e sub bacias que atendam a região de influência considerada. O sistema destaca-se também por ser uma proposta extremamente eficiente na manutenção e aprimoramento da resiliência nas cidades (DONG et al. 2017).

As propriedades de retenção e direcionamento de águas pluviais de pavimentos permeáveis podem ser enquadradas nas propostas de planejamento e funcionamento de sistemas de drenagem de águas superficiais (CANHOLI, 2005). O autor destaca como diretrizes para gestão de dispositivos e sistemas de controle de drenagem urbana, entre outros, o estabelecimento de sistemas de sedimentos, e a adoção de dispositivos que possibilitem o retardamento da onda de cheia, que consiste na redução da velocidade média de translação do escoamento pela canalização; aumento do tempo de percurso da onda cheia e tempo de concentração da bacia; e redução dos picos de vazão.

No Brasil, a tecnologia, ainda em fase de desenvolvimento e implementação, vem sendo adotada por construtores para atender ao que as legislações municipais determinam em relação à infiltração e permeabilidade na pavimentação de terrenos (PANSERA, PIMENTA, e ANDRADE, 2014), conforme recomendações da NBR 16416 (ABNT, 2015). A prefeitura de Belém, por exemplo, sob disposição da Lei N° 8655/2008 (2008) e conforme recomendado no Plano Diretor Municipal, estabelece o mínimo de 10% da área total de vias de circulação em edificações permeável, dando abertura para propostas que vão da utilização de blocos intertravados de concreto, superfícies verdes compostas por jardins a coberturas pavimentadas com concreto permeável.

Pretende-se, por meio deste estudo, contribuir com o conhecimento a respeito da viabilidade de que sejam amplamente utilizados sistemas drenantes de concreto permeável em Belém e na região amazônica, por meio do melhor entendimento da problemática frente às condições de entorno e da tecnologia propriamente dita, e adequação desta à realidade regional, corroborando, desse modo, para a implementação de modelos urbanísticos inovadores e sustentáveis para a Região Metropolitana de Belém (RMB) e para a Amazônia.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As frequentes inundações e alagamentos em Belém, notadamente nas áreas de baixada, são decorrentes de diversos fatores, que corroboram mutuamente para a crise de drenagem urbana na capital paraense, dentre os quais pode-se destacar:

- As taxas anuais de precipitação que figuram entre as maiores do país, segundo o Atlas Pluviométrico do Brasil desenvolvido pelo programa de Levantamento da Geodiversidade (CPRM, 2006), em série cumulativa de 1977 a 2006, e podem chegar a até 3000 mm anuais (SANTOS, 2017);
- A ineficiência de parte dos componentes do sistema de drenagem, que não possuem capacidade de absorção compatível com a carga de vazão total das águas pluviais da região, seja pelo acúmulo de lixo urbano, pela incompatibilidade dimensional gerada pela alta demanda de vazão de escoamento superficial, ou mesmo pela falta de manutenção preventiva (TUCCI, 2002; FRAGOSO et al., 2016);
- A ocupação inadequada e irregular de áreas próximas aos leitos dos rios que cruzam a cidade, suscetíveis a alagamentos, principalmente por populações em situação de extrema vulnerabilidade social (PONTE e BRANDÃO, 2014);
- E, finalmente, a interferência do regime de marés nos rios que cortam a cidade e que, segundo Martins (2015), formam uma barragem hídrica que prejudica o escoamento de águas.

Os fatores identificados em Belém podem ser associados a diversos outros municípios da região amazônica, que estão inseridos na Zona Bioclimática 8 <sup>2</sup>(NBR 15220 – Parte 3, 2003), caracterizada por elevados índices pluviométricos anuais e pela influência, em diversas localidades, do regime de marés. Ressalta-se ainda que, atrelado a tais fatores, a região Norte, e particularmente o estado do Pará, apresentam os piores índices de saneamento básico do país, com apenas 20% dos domicílios com acesso a coleta de lixo e esgoto e, conseqüentemente,

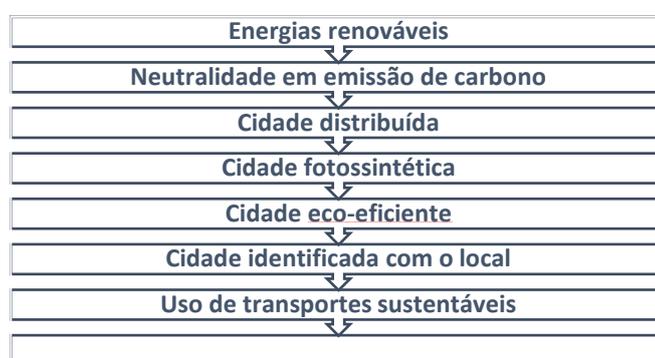
---

<sup>2</sup> A NBR 16416 (ABNT, 2015) divide território nacional em zonas bioclimáticas, e fornece diretrizes construtivas para o desempenho térmico de edificações tendo como parâmetro as características climáticas de tais zonas. A Zona Bioclimática 8 corresponde a quase totalidade região Norte, parte da região Centro-Oeste e o litoral das regiões Nordeste e Sudeste do Brasil. A divisão feita não leva em consideração diversas particularidades que diferem algumas regiões das outras, mas é utilizada, na presente discussão, para representar o que seria, na região Norte, um parâmetro de similaridade entre os municípios da região com o município de Belém, no Pará, e que possam direcionar, até certo patamar, as condições de contorno que serão utilizadas no presente estudo (chuvas intensas, coberturas densamente impermeabilizadas).

baixa qualidade de serviços de drenagem de águas superficiais (Portal do Saneamento Básico, 2019).

Nesse contexto, Newman et al. (2009) destacam a importância de que sejam desenvolvidos sistemas urbanos flexíveis, ecoeficientes e suportados por tecnologias com parâmetros de desempenho que atendam às necessidades locais, promovendo soluções sustentáveis e que possibilitem o cultivo de componentes urbanos que atuem em favor da preservação de estruturas essenciais às funções básicas da cidade. Segundo os autores, as diversas variáveis que corroboram para a criação de uma cidade resiliente estão agrupados na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Componentes da Cidade Resiliente

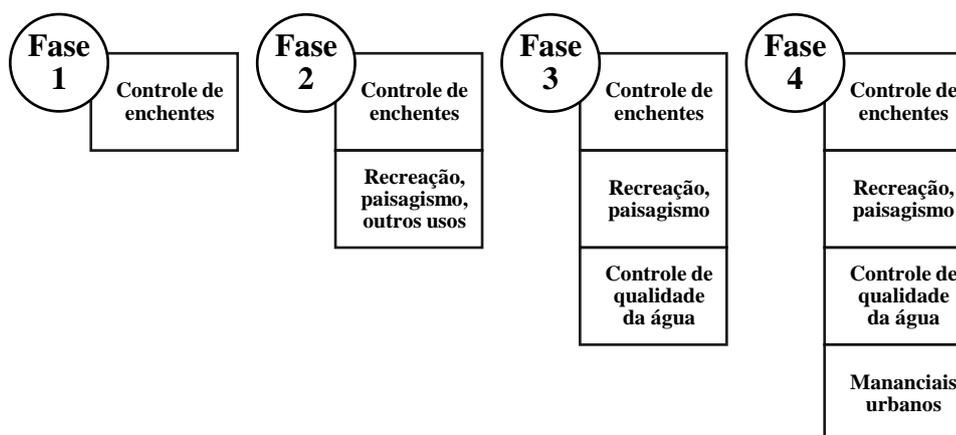


Fonte: Adaptado de Newman et al. (2009)

Os autores abordam, como uma das subcategorias que contribuem para a Cidade Resiliente, o conceito de Cidade Fotossintética, que abrange substancialmente medidas locais de aproveitamento de recursos, como água da chuva, por exemplo, e utilização de materiais de construção civil a nível regional de baixo impacto, relacionando-se principalmente à redução de deslocamentos e emissão de poluentes.

Incorpora-se à discussão o quadro ilustrativo de evolução de projetos de retenção em centros urbanos, proposto por Welsh (1989), (Figura 1.2), no qual os autores abordam o desenvolvimento de propostas drenantes em torno das preocupações sociais pertinentes para as realidades regionais de controle de enchentes, que possibilitem o aumento da qualidade de vida da comunidade através da criação de centros de recreação e controle de qualidade da água.

Figura 1.2 – Fases de controle de enchentes em meios urbanos



Fonte: Adaptado de Canholi (2005).

No quadro, cada fase representa o grau de atuação do planejamento municipal frente às propostas de drenagem. A fase 1 engloba o estado de planejamento no qual o poder público ainda trabalha para desenvolver sistemas drenantes que sejam eficientes no controle de enchentes e problemáticas básicas de escoamento de águas superficiais. Na fase 2, considera-se que haja um planejamento de controle de enchentes funcional, e iniciam-se, desse modo, planos de ação voltados à utilização de componentes de drenagem associados à recreação e ao paisagismo, como, por exemplo, através da criação de lagoas e jardins públicos.

A fase 3 comporta sistemas de drenagem eficientes e funcionais que já estão incorporados à paisagem urbana. Nesta fase, são acrescentados planos de controle de qualidade da água, através de propostas voltadas à filtragem e reutilização sustentável de águas superficiais, por exemplo. A fase 4, por sua vez, associa a gestão e controle de escoamento de águas pluviais de maneira mais sustentável e resiliente, adaptada à paisagem urbana, e representa a perspectiva de gestão sob a ótica de desenvolvimento de sistemas de drenagem pertinentes ao lazer da população, à qualidade da água que será direcionada às bacias e sub bacias municipais e à criação de mananciais urbanos.

No município de Belém, é possível observar as condições físicas, morfológicas e de manutenibilidade dos componentes de drenagem a partir de alguns estudos: Fragoso et al. (2016) realizaram estudo de diagnóstico dos sistemas de macro e microdrenagem em Belém. Os autores identificaram diversos focos de inundação nas bacias e sub bacias da cidade, e concluíram que as ações praticadas pela gestão municipal são corretivas e ineficientes,

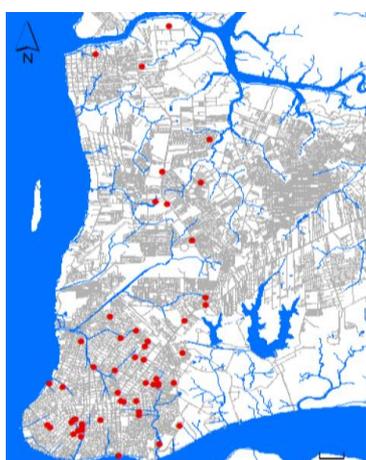
prejudicam a mobilidade e acessibilidade da população, além de aumentarem o risco de proliferação de doenças vetorizadas pela água.

Pontes et al. (2017), por sua vez, identificaram a ação conjugada de elevados índices pluviométricos e cheias nas bacias hidrográficas associadas às transformações do município, caracterizadas principalmente pela evolução de processos de impermeabilização dos solos e redução das taxas de infiltração. Os autores destacam, ainda, que a ocupação de populações migrantes em áreas de várzeas e regiões vulneráveis a alagamentos intensificam problemas relacionados ao lançamento de efluentes e resíduos sólidos em locais inadequados.

Finalmente, destaca-se estudo desenvolvido por Sadeck, Souza e Silva (2012), que realizaram mapeamento dos focos de alagamento e do risco de desastres ambientais associadas a inundações nos bairros do município. Os autores apontaram a necessidade de que sejam adotadas políticas públicas efetivas e voltadas às particularidades da cidade, promovendo o remanejamento de populações que vivem em áreas de risco, além da adoção de programas de educação ambiental.

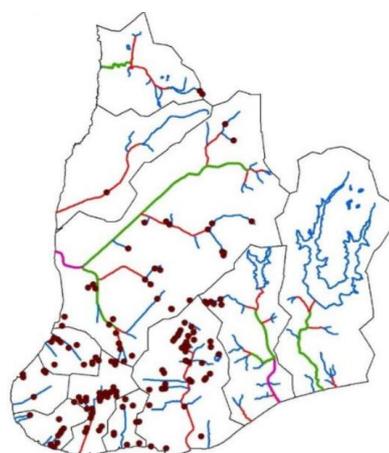
A Figura 1.3 apresenta os estudos desenvolvidos por Sadeck, Souza, e Silva (2012) (Figura 1.3.A) e Pontes et al. (2017) (Figura 1.3.B), que apontaram diversos focos de alagamento no município de Belém em 2012 e 2017, revelando, além da alta incidência de alagamentos associados à cheia dos rios e às elevadas taxas pluviométricas do município, a baixa efetividade do poder público no combate a focos de alagamento entre os períodos analisados, atestando, desse modo, que as práticas governamentais não tem sido eficientes no combate à ocorrência de tais problemáticas.

Figura 1.3.A) – Pontos de alagamento identificados em estudo de 2013. B) Pontos de alagamento identificados em estudo de 2017.



A

Fonte: Sadeck et al. (2012)



B

Fonte: Pontes et al. (2017)

Entende-se, portanto, que o município de Belém pode ser enquadrado na Fase 1 do planejamento de drenagem, estando a gestão pública ainda em processo de desenvolvimento sistemas de drenagem que possam responder satisfatoriamente às demandas pluviométricas da região.

Nos últimos anos, alguns estudos regionais foram desenvolvidos com o objetivo de avaliar a aplicação de pavimentos permeáveis de concreto como proposta para apaziguar as problemáticas associadas às inundações e alagamentos em algumas áreas da capital paraense. Apesar de terem sido apresentados resultados satisfatórios em relação ao potencial de percolação de águas superficiais em concretos permeáveis com insumos regionais, foram observadas limitações em relação à resistência mecânica dos materiais, principalmente quando da utilização do seixo de cava como agregado graúdo: as amostras de concreto apresentaram resistência à tração na flexão variando de 1,0 MPa a 1,7 MPa (SOUZA e CARVALHO, 2016); quanto à resistência à compressão axial, os resultados obtidos ficaram limitados a 2,9 MPa de resistência média (PEREIRA et al., 2017).

Tais desempenhos mecânicos restringem o uso da tecnologia a vias de tráfego de pedestres, uma vez que a determinação normativa estabelece resistência à tração na flexão de no mínimo 2 MPa para uso de concretos permeáveis em vias de tráfego de veículos leves (NBR 16416, 2015). Em estudos mais recentes, no entanto – ainda não publicados ou apresentados, desenvolvidos no Laboratório de Engenharia Civil da UFFa, foram obtidas resistências superiores a 2 MPa e, portanto, com potencial para uso em vias de tráfego de veículos leves (garagens, estacionamentos, vias com baixa circulação de veículos).

Destaca-se, assim, que estudos voltados à validação de camadas drenantes na região tem como objetivo não somente a incorporação de soluções alternativas, inovadoras e menos agressivas do ponto de vista ambiental a partir da utilização de insumos regionais abundantes, mas também o enfrentamento de antigos problemas de drenagem que ainda prejudicam fortemente a qualidade de vida da população, notadamente indivíduos que vivem nos entornos de bacias que alagam frequentemente devido à ação de águas pluviais e elevações periódicas do nível dos rios que cortam o município, e que tendem a agravar-se ante às soluções ineficazes adotadas pela gestão municipal.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar a viabilidade técnica de concretos permeáveis de seixo de cava para uso em regiões com intenso regime pluviométrico.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Analisar parâmetros de comportamento mecânico e hidráulico de concretos permeáveis de seixo de cava com duas combinações granulométricas, tendo como parâmetro de escolha o empacotamento ótimo para as granulometrias escolhidas;
- b) Analisar a ocorrência de escoamento superficial e capacidade de infiltração de água em concretos permeáveis de seixo de cava sob a ação de chuvas intensas;
- c) Avaliar a potencialidade do uso de pavimentos permeáveis para redução da vazão superficial em trecho da bacia do Una, em Belém;

## **1.3 APRESENTAÇÃO**

O texto está organizado de modo a dar ao leitor ampla visão das potencialidades e relevância deste estudo, que aborda um tema recorrente em discussões de planejamento urbano e planos diretores municipais: sistemas de drenagem inovadores e eficazes.

O capítulo 1, introdutório, conceitua diversas problemáticas associadas ao processo de urbanização e impermeabilização superficial das cidades, ante a propostas de infraestruturas de drenagem sustentáveis. Nesse capítulo é discutida a problemática em torno de enchentes e inundações em Belém e sua Região Metropolitana, e o desafio de propor soluções e atenuantes compatíveis com a realidade climática e social de um centro urbano situado no coração da maior floresta do mundo. São elencados ainda, os objetivos da pesquisa, destacando a relevância de que sejam desenvolvidas soluções de drenagem voltadas para as particularidades pluviométricas regionais, de modo que seja fortalecida a identidade construtiva local com o sistema urbano e com a sociedade.

O capítulo 2, referente à revisão bibliográfica, aborda conceitos primordiais que cerceiam propostas de infraestrutura sustentável, notadamente aquela proposta no presente estudo, destacando as principais características de concretos permeáveis, de durabilidade a limitações

construtivas e de implantação. O capítulo trata ainda do embasamento teórico abordado para a definição dos parâmetros de entrada do estudo, bem como o método de dosagem do material.

O capítulo 3 trata da metodologia propriamente dita, através do programa experimental: a escolha de granulometrias que possibilitem combinações binárias com o melhor empacotamento de grãos, a definição do consumo de cimento para cada mistura, e ensaios no estado fresco e endurecido, que permitam ao autor elencar as principais propriedades do objeto de estudo. O capítulo aborda, ainda, a perspectiva de projetos de pavimentos drenantes para a realidade de Belém, considerando o potencial de redução de vazão superficial à jusante nas bacias e sub bacias que cortam e servem a cidade.

O capítulo 4 discute os resultados obtidos, além de conclusões relevantes que foram observadas a respeito do estudo realizado. São abordados resultados de desempenho hidráulico, mecânico, e estabelecidos pareceres teóricos para uso de coberturas drenantes no município, a partir de estimativa em microbacia inserida na bacia do Una.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

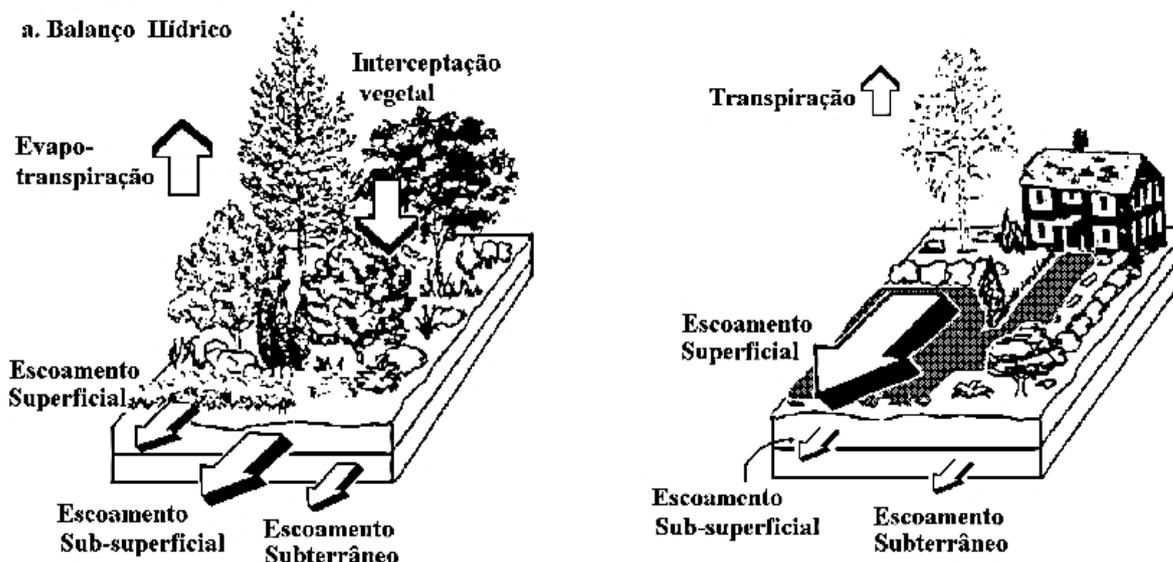
### 2.1 DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL

A drenagem urbana, conforme definido por Carneiro e Miguez (2011), é uma das redes que compõem a infraestrutura de uma cidade, a qual é representada por diversos sistemas de saneamento ambiental, tais como sistema de abastecimento de água, sistema de esgotamento sanitário, sistema de drenagem de águas pluviais e sistema de coleta de lixo. O sistema de drenagem de águas superficiais corresponde à coleta, manejo e despejo de águas pluviais em corpos d'água, por meio de dois componentes primordiais: micro drenagem, equivalente à morfologia do traçado das ruas e representada por sarjetas, bocas de lobo, galerias, tubos de ligação e poços de visita; e macrodrenagem, representada pelas sub bacias que cortam a rede urbana e que, conforme adotado pela gestão tradicional de águas urbanas, tem sua curvatura e dimensões alteradas de modo que se adequem à morfologia da cidade.

A drenagem urbana e a gestão de recursos hídricos, notadamente em grandes cidades e megalópoles, apresentam forte influência sobre a qualidade de vida das populações, em especial aquelas instaladas em torno de bacias e sub bacias que foram canalizadas e urbanizadas. Além disso, Santos (2017) aponta que as problemáticas associadas a alagamentos intensificam casos de doenças de veiculação hídrica, tais como leptospirose e febre tifoide, por exemplo, por conta do transporte de resíduos sólidos e rejeitos através dos cursos d'água canalizados. A autora aponta, ainda, que embora tais problemáticas possam afetar todos os núcleos sociais, populações vulneráveis tendem a ser mais atingidas.

O processo de urbanização e impermeabilização superficial, por sua vez, reduz o percentual de água infiltrada diretamente no solo, e modifica fortemente os picos de cheia nas bacias e sub bacias que cruzam e abastecem as cidades. A Figura 2.1 ilustra o processo de impermeabilização de superfícies naturais, conforme o espaço urbano evolui. A cobertura drenante natural perde potencialmente até 80% da capacidade de infiltração de água, e há, proporcionalmente, forte incremento do escoamento superficial. Ressalta-se, ainda, que as interações que compreendem o balanço hídrico natural são alterados a ponto de comprometer o abastecimento de aquíferos subterrâneos e os processos que levam à formação de chuvas.

Figura 2.1 - Processo de redução da permeabilidade de superfícies pela urbanização das cidades.



Fonte: Tucci (1990)

Desse modo, a preocupação em inibir ou extinguir práticas humanas que contribuam para a degradação ambiental nos centros urbanos resultou em um movimento global para o desenvolvimento de técnicas de arquitetura sustentável, principalmente em países mais industrializados. Destaca-se a criação, pela comunidade europeia de arquitetura, de Guias e Manuais de práticas sustentáveis, dentre os quais se pode citar a publicação, em 2007, da cartilha *Développement Durable et Architecture Responsable* (Desenvolvimento Sustentável e Arquitetura Responsável, em tradução livre), uma cartilha que exemplifica técnicas e modelos construtivos em prol do desenvolvimento de comunidades sustentáveis, considerando-se a melhoria das condições de existência das comunidades humanas, e permanecendo nos limites da capacidade de carga dos ecossistemas. Na cartilha, são abordados sistemas construtivos sustentáveis e alternativos, além de modelos de urbanização planejada, que evitam a ocupação irregular ou irrestrita de terrenos localizados em áreas sensíveis à ocorrência de alagamentos.

O governo chinês, por sua vez, lançou em 2012 um plano de ações integradas entre tecnologias de drenagem tradicionais e inovadoras, com o objetivo de desenvolver as chamadas cidades-esponja, flexíveis às mudanças climáticas e alterações ambientais, ao avanço urbano e crescimento populacional. O plano das cidades-esponja está atrelado conceitualmente às cidades resilientes, adaptáveis e sustentáveis, equipadas com sistemas de drenagem capazes de absorver, armazenar purificar e reutilizar, quando possível, águas pluviais (DONG et al. 2017; PENG et al. 2019; ZHONG, LENG, e POON 2018).

Tucci (2002), do mesmo modo, destaca a necessidade de que os municípios brasileiros adotem Planos Diretores de Águas Pluviais (PDAPs) como mecanismo de gestão de sistemas de drenagem e recursos hídricos, apropriados à realidade de cada cidade. O autor aponta que os PDAPs devem abordar políticas públicas de águas pluviais, com princípios de controle, bem como diagnósticos dos sistemas de drenagem em uso e propostas de alternativas para contenção de inundações urbanas. As soluções devem contemplar propostas estruturais, que abordem práticas aplicadas diretamente sobre os sistemas de macro e micro drenagem, e não-estruturais, a partir de campanhas de conscientização da população e políticas públicas para a manutenção dos recursos hídricos.

Canholi (2005), por sua vez, aponta que as medidas estruturais envolvem obras de engenharia, que podem ser intensivas – relacionadas ao escoamento de águas superficiais - ou extensivas – relacionadas mais comumente à adoção de sistemas de armazenamento e reservação temporária de águas pluviais, de modo a controlar e parcelar o volume escoado. Medidas não-estruturais, segundo o autor, envolvem o controle de uso e ocupação de solos, e programas de educação ambiental voltados à correta utilização da água, além de medidas de previsão de inundações. A previsão de inundações tem função social de preparar a população e o município, tanto para o remanejamento do tráfego e pessoas, quanto para a garantia de que sejam mantidos serviços básicos e indispensáveis, sem causar maiores transtornos às pessoas.

As propostas de Tucci (2002) e Canholi (2005) exemplificam esforços e diretrizes para o enfrentamento de desastres ambientais de inundações, além da proposição de sistemas e planos que possam atuar em concomitância com os sistemas de drenagem tradicionais. Historicamente, os mecanismos tradicionais de gestão de recursos hídricos e drenagem urbana envolvem propostas que visam o escoamento acelerado de águas pluviais das áreas urbanas que envolvem, por exemplo, a captação de águas superficiais por bocas-de-lobo, o deságue até sistemas de macrodrenagem, como canais abertos e galerias, e o escoamento à jusante das bacias e sub bacias urbanas (VIRGILIIS, 2009). Sistemas tradicionais apresentam, conforme já fora abordado ao longo do texto, altos picos de vazão e altas velocidades de escoamento nos condutos, justamente por possuírem como princípio o escoamento de águas superficiais no menor tempo possível.

Canholi (2005) afirma que tais características de sistemas tradicionais podem alterar o somatório dos hidrogramas de enchentes de sub bacias, ocasionando inundações pela redução do tempo de concentração como resultado da canalização. O autor propõe ações alternativas para evitar a elevação dos picos de cheia nas sub bacias e bacias urbanas, como a manutenção

do traçado natural do córrego original; a redução das declividades pela introdução de degraus ou manutenção das declividades naturais; e a adoção de revestimentos rugosos. Todas as soluções têm como características em comum a redução da velocidade de translação do escoamento, aumento do tempo de concentração e redução dos picos de vazão nas sub bacias afetadas. A Figura 2.2 exemplifica a utilização de biovaletas como mecanismos de retenção do escoamento superficial.

Figura 2.2 - Biovaletas como mecanismo de retenção de águas superficiais, redução da velocidade e aumento do tempo de escoamento.



Fonte: Cormier e Pellegrino (2008).

No contexto de redução de picos de cheia e de vazão à jusante dos sistemas hídricos, surge a discussão em torno de infraestruturas compreensíveis e sustentáveis, composta geralmente por infraestrutura verde, sistemas naturais e pavimentos permeáveis. Canholi (2005) destaca a adoção de dispositivos de infiltração e percolação de águas superficiais, representada por jardins verticais e horizontais, telhados verdes e pavimentos porosos, que favorecem o aumento do tempo de concentração e redução dos picos de vazão.

O autor aborda também a utilização de dispositivos de contenção a jusante, representada por sistemas de reservação incorporados à paisagem urbana, como reservatórios on-line - na mesma linha do trajeto de escoamento da bacia até o corpo receptor, e off-line - paralelos ao trajeto de escoamento da bacia até o corpo receptor. Tais sistemas atuam também como dispositivos paisagísticos e de lazer da população.

Cormier e Pellegrino (2008), por sua vez, apontam que a incorporação de dispositivos verdes à realidade urbana deve contemplar possibilidades de conexão com a realidade local. Segundo os autores, o único meio de tecnologias verdes progredirem em escala global é por meio do entendimento de que essas tecnologias devem ser continuamente readequadas às

realidades regionais, de modo que respondam às demandas específicas das populações que serão responsáveis pelo sucesso de sua aplicação, utilização e manutenção.

Os autores destacam que as possibilidades de conexão da população com infraestruturas verdes remetem primeiramente à educação da comunidade de entorno, por meio do entendimento do funcionamento e do impacto de tais dispositivos sobre a realidade das pessoas. Depois, a conexão é representada pela identidade regional: o sucesso da adaptação de uma infraestrutura verde à determinada região depende intrinsecamente da compreensão das limitações e potencialidades locais em relação à tecnologia proposta.

Ratifica-se, portanto, que o sucesso de aplicação de tecnologias sustentáveis depende diretamente da relação que essas tecnologias terão com a realidade da comunidade local, tanto no que diz respeito ao entendimento que as pessoas terão do uso e à eficiência do dispositivo/sistema, quanto em relação à adaptação deste aos materiais locais e à paisagem da região.

Cormier e Pellegrino (2008) abordam, finalmente, a conexão por meio da arte, ou seja, pela incorporação das infraestruturas verdes em convergência com ações de artistas locais; a conexão por meio da ligação com o movimento moderno, de modo que os sistemas sustentáveis “conversem” com a arquitetura moderna; e a conexão por meio do encontro, ou seja, a incorporação das tecnologias verdes aos horários de lazer das pessoas, e a associação delas às coisas agradáveis que as pessoas imaginam quando imaginam o ambiente urbano.

Rocha e Sattler (2017), por sua vez, defendem que a aceitação a tecnologias sustentáveis depende diretamente da percepção que o público tem da função e da incorporação da tecnologia ao sistema urbano. Os autores estabelecem que as tecnologias verdes devem ser projetadas de modo a tornar evidentes os benefícios advindos de sua aplicação, e com o cuidado de esclarecer procedimentos de uso e manutenção, evitando, desse modo, dúvidas e questionamentos.

Pavimentos permeáveis destacam-se, dentro dessa discussão, como sistema de drenagem sustentáveis, que funcionam tanto para infiltração direta de águas superficiais no subsolo quanto para reserva temporária de águas pluviais, e reduzem a solicitação de vazão nos percursos d'água. Os dispositivos, além de funcionarem como mecanismos de drenagem sustentáveis, por permitirem a redução da vazão a jusante nas sub bacias às quais as águas superficiais serão direcionadas, e permitirem a percolação da água diretamente para o subsolo, podem utilizados como componentes paisagísticos do sistema urbano.

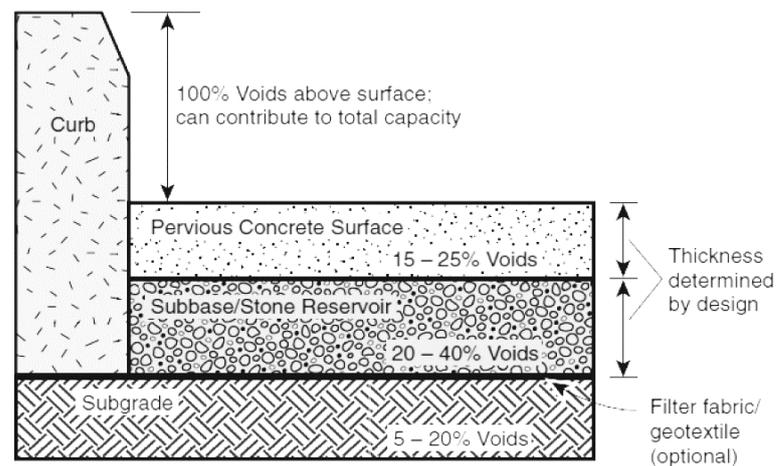
Tennis, Leming e Akers (2004), no entanto, apontam que as propriedades de permeabilidade em coberturas porosas dependem fortemente dos materiais utilizados e das técnicas de

adensamento utilizadas. Os autores destacam ainda que a eficiência hidráulica de drenagem desses dispositivos depende de estudos hidrológicos adequados, principalmente de modo que sejam dimensionados reservatórios que correspondam às demandas pluviométricas da região de implementação da tecnologia.

Estudos de Nakamura et al. (1998) *apud* Canholi (2005) apontam a influência da sub base dos pavimentos drenantes para reservação de águas pluviais, e a ACI 522R-10 (2010) afirma que a capacidade de reservação é altamente influenciada pela espessura da camada de sub-base, bem como pela escolha adequada de materiais com resistência e granulometria adequada, seja para receber e distribuir as cargas de sollicitação transmitidas à cobertura permeável, como para garantir a porosidade mínima desejável para o sucesso da estrutura.

A Figura 2.3 exemplifica um modelo de pavimento permeável, composto por cobertura de concreto permeável, sub-base granular e infiltração direta no solo. Deve-se destacar que pavimentos permeáveis só direcionarão águas superficiais diretamente para solos que possuam capacidade de absorção em acordo com o volume solicitante, conforme recomendação de Aciolli (2005). Solos argilosos e expansivos, por sua vez, devem ser cobertos com mantas geotêxteis e sistema de direcionamento da água reservada, por meio de canaletas, valas ou sarjetas.

Figura 2.3 - Exemplo de configuração de Pavimento permeável.



Fonte: Rodden, Voigt, e Smith (2011)

Esses cuidados visam a conservação e bom funcionamento das camadas drenantes, visto que solos argilosos possuem baixíssima capacidade de absorção, resultando na ineficiência do pavimento drenante, caso não haja o adequado direcionamento e escoamento da água. No caso

de solos expansivos, o cuidado tem o objetivo de evitar a descaracterização do pavimento permeável, ocasionado pela colmatagem dos poros conectados por ascensão de finos do solo.

## 2.2 DRENAGEM URBANA EM BELÉM

O sistema de drenagem urbana de Belém e região metropolitana, construído sob a lógica da gestão tradicional de águas superficiais, é organizado para que toda a água seja escoada rapidamente para as baixadas; a alta velocidade de escoamento, associada à impermeabilização das camadas superficiais de solo, a elevadas taxas pluviométricas, a severas modificações nas trajetórias naturais das sub bacias ocasionadas pelo processo de urbanização, à incompatibilidade dos sistemas de drenagem com a realidade regional, tem como consequência diversos focos de inundação na cidade, conforme abordado nos estudos de Sadeck, Souza e Silva (2012), Fragoso et al. (2016) e Pontes et al. (2017).

Segundo Martins (2015), a ocorrência de alagamentos está relacionada à deficiência dos sistemas de drenagem adotados pelo município, que não suportam a totalidade de volume demandada para escoamento, o que tem como consequência o transbordo do leito de bacias. A autora relaciona ainda as inundações com a combinação de fatores como os elevados índices pluviométricos, cheias de rios que cortam o município e inundações de planícies pluviais.

Santos e Rocha (2015), por sua vez, apontam como agravantes às inundações na capital paraense, o avanço urbano sem o planejamento de infraestruturas de saneamento e drenagem, além de processos de perda e substituição de vegetações remanescentes por coberturas impermeáveis, ocasionando inundações em área de baixada e regiões próximas de bacias e microbacias canalizadas, influenciadas por cheias nas bacias que servem o município. Pereira (2013) apresenta áreas alagáveis na RMB como consequência do efeito maré, com cota de inundação de até 4 metros, e das elevadas taxas pluviométricas, de até 3000 mm/ano.

Martins (2015) aponta, finalmente, que a bacia hidrográfica do Rio Amazonas, no Pará, apresenta a pior relação entre estações pluviométricas e fluviométricas, considerando a extensão, magnitude e importância hídrica da bacia em questão (ANA, 2013), e que o restrito acesso a informações hidrológicas e hidráulicas básicas - que, no caso da região, limitam-se aos cursos principais - prejudicam análises mais aprofundadas da dinâmica das bacias e sub bacias que servem os municípios da região.

Para avaliação das atuais condições de ocupação do solo e estruturas de saneamento ambiental e drenagem de águas superficial, toma-se como exemplo a bacia do Una, a maior

dentre as bacias nas quais o município de Belém<sup>3</sup> está inserido: segundo Santos (2017), considerando áreas vegetadas, não cobertas por camadas impermeáveis de asfalto ou concreto, como áreas permeáveis onde é possível que a água infiltre diretamente no solo, a bacia conta com 18,7% de permeabilidade. Segundo a autora, esse é o pior índice de permeabilidade dentre todas as bacias hidrográficas do município. A autora também verificou que a densidade demográfica da bacia do Una é de cerca de 140 hab/ha – entre as três maiores de Belém, o que, para os padrões de urbanização e densidade demográfica característicos da região, tipifica-a como intensamente povoada.

Dadas as características de uso e ocupação do solo na bacia do Una, bem como as previsões de aumento populacional e avanço urbano sem planejamento junto à esfera pública, principalmente de populações vulneráveis para áreas de risco próximas de canais, é latente a necessidade de propor e implementar soluções de infraestrutura resilientes e sustentáveis, capazes de se incorporar ao ambiente urbano e suas demandas atuais, além de suportar, como nas cidades-esponja chinesas, a imprevisibilidade das mudanças econômicas, urbanas, ambientais e sociais de um futuro incerto.

De acordo com informações fornecidas pelo site da prefeitura, acessado em outubro de 2019, a Gestão municipal tem realizado diversas obras de macrodrenagem em sub bacias e canais de Belém, além de ações educativas e de ouvidoria promovidas pela Agência Reguladora de Água e Esgoto de Belém (AMAE), com o intuito de inibir desastres ambientais de inundações e alagamentos que atingem a cidade em períodos de chuvas mais intensas combinadas à ação das cheias de marés. A Secretaria Municipal de Saneamento (SESAN), responsável pela manutenção dos canais urbanos, aponta ações de manutenção regulares, que não tem tido, no entanto, efetividade contra as inundações (PONTES et al. 2017; FRAGOSO et al., 2016; SADECK et al., 2012).

A integração de planos de drenagem alternativos e resilientes que possam funcionar juntamente com os sistemas tradicionais em funcionamento no município deve, portanto, ser acompanhada de propostas que tenham como objetivo não somente fazer frente aos fenômenos de inundação que ocorrem costumeiramente e que se intensificam com o tempo, mas também

---

<sup>3</sup> Há, ao todo, 14 bacias inseridas na cidade de Belém e sua região metropolitana, respectivamente: Bacia do Ananin; Bacia do Outeiro; Bacia do Paracuri; Bacia do Cajé; Bacia do Mata Fome; Bacia de Val-de-Cães; Bacia do Una; Bacia do Reduto; Bacia da Tamandaré; Bacia da Estrada Nova; Bacia do Tucunduba; Bacia do Murutucum; Bacia do Aurá; e Bacia Do Pratiquera.

para que se possa garantir à população perspectivas de serviços de saneamento ambiental que apresentem funcionalidade e durabilidade.

### **2.3 CONCRETO PERMEÁVEL: PROPRIEDADES E APLICAÇÕES**

A tecnologia de coberturas drenantes de concreto permeável foi aplicada inicialmente na Europa, ainda no século XIX, mas foi efetivamente incorporada como sistema de drenagem em residências e como componente de gestão para drenagem urbana somente a partir do fim da segunda guerra mundial, quando da escassez de recursos financeiros e matéria-prima em diversos países devastados pela guerra (GHAFOORI, 1995). Desde então, notadamente na França, Bélgica e Escócia (ACI 522R-10, 2010), tem sido utilizado como revestimento de vias e calçadas (SUZUKI et al., 2013), para que possa funcionar como estrutura de apoio ao sistema de drenagem principal.

O conceito de pavimento permeável é relacionado a estruturas compostas por matriz porosa, com função mecânica de absorver os impactos associados ao tráfego, e hidráulica associada à retenção temporária de águas pluviais e distribuição a drenos laterais ou bocas de lobo (SUZUKI et al., 2013). Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), pavimento permeável é aquele que atende simultaneamente às solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento, e cuja estrutura permite a percolação ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar dano à sua estrutura. A tecnologia é caracterizada pela composição básica de aglomerante, água, agregados graúdos, com ou sem a presença de finos, e com ou sem o acréscimo de adições minerais e aditivos que visem a otimização de propriedades reológicas do material.

Como tecnologia LID, o concreto permeável tem sido cada vez mais utilizado como uma solução viável e sustentável para problemáticas associadas à drenagem e armazenamento de águas superficiais. O sistema pode ser implementado tanto em substituição à chamada infraestrutura cinza (XIE, AKIN, e SHI, 2019), como em associação a sistemas inovadores ou mesmo tradicionais. Estudos de resiliência em sistemas de drenagem compreensivos apontam, no entanto, que comparativamente pavimentos permeáveis de concreto apresentam potencial de resiliência superior a sistemas de drenagem tradicionais, como poços de retenção, e mesmo entre propostas LID – como os telhados verdes, por exemplo (DAMODARAM et al., 2010; DONG et al. 2017).

Entre os pavimentos permeáveis, sistemas com concreto permeável também apresentam desempenho superior quanto à atenuação de ilhas de calor, redução de ruído e manutenibilidade

do potencial de permeabilidade com o tempo (CHU, FWA, e TAN, 2017; GOEDE e HASELBACH, 2011; KUMAR et al. 2016). Considera-se, ainda, que em ambientes vastamente urbanizados, é possível que pavimentos permeáveis apresentem, ao longo dos anos, maior durabilidade que coberturas vegetadas naturais (VALINSKI e CHANDLER, 2015). Isso ocorre porque quando as áreas vegetadas estão desprotegidas de agentes agressivos de entorno, como grandes volumes de água escoados superficialmente por coberturas impermeáveis, as coberturas vegetadas correrão grandes riscos de redução de permeabilidade e erosão (SANTOS, 2017).

A ACI 522R-10 (2010) apresenta diversas vantagens de pavimentos permeáveis sobre os pavimentos convencionais, impermeáveis, dentre as quais se pode destacar:

- Controle da poluição em águas pluviais; o design estrutural de pavimentos de concreto permeável favorece a primeira filtragem de águas pluviais, que corresponde à retenção de partículas sólidas e compostos químicos agressivos ao meio ambiente, tais como óleos vazados de veículos.
- Controle de escoamento de águas pluviais; a espessura do pavimento permeável é distribuída entre a cobertura de concreto, base, sub-base e camadas auxiliares. A capacidade de absorção e retenção de águas pluviais está diretamente relacionada à espessura das camadas, bem como ao percentual de vazios em cada camada. A norma recomenda que a sub-base seja composta por material granular com percentual de vazios de 20 a 40%.
- Redução de derrapagem e reflexo em vias e autoestradas; a norma destaca que a capacidade absorptiva do concreto evita a formação de película d'água na superfície do pavimento.
- Redução da interação entre rolamento e pavimento; a interação rolamento-pavimento é influenciada pela porosidade da camada de cobertura do pavimento. Concretos permeáveis possuem elevado teor de vazios, reduzindo, portanto, a interação entre as superfícies. Desse modo, concretos permeáveis atuam também como redutores/absorvedores de ruído, devido à alta porosidade e conectividade dos poros. Destaca-se que características dos poros na matriz de concreto, tais como dimensões e distribuição e poros internos e superficiais apresentam relevante influência sobre a capacidade e níveis de frequência absorvidos pelas camadas porosas.

Meddah et al. (2017) destacam ainda como características positivas do uso de pavimentos permeáveis, o abastecimento de aquíferos, a redução da formação de ilhas de calor e o aumento de resistência à derrapagem, sendo essa característica também associada à não existência da película d'água na superfície do pavimento.

Cabe ressaltar que apesar de possuir custo inicial de implantação da tecnologia maior que pavimentos convencionais de concreto e asfalto (CHANDRAPPA e BILIGIRI, 2016), os ganhos associados à implantação de pavimentos permeáveis em realidades locais a longo prazo são notáveis, do ponto de vista da sustentabilidade do sistema, que tem potencial de purificação e reservação de águas pluviais, e a redução de custos com filtragem, possibilitando a utilização da água reservada para diversas finalidades.

Entre os maiores empecilhos para ampla utilização de concretos permeáveis está na falta de padronização das propriedades específicas da tecnologia, e falta de especialistas no processo construtivo, que exige diversos cuidados (CHANDRAPPA e BILIGIRI 2016; XIE et al. 2019). AACI 522R-10 (2010), por sua vez, apresenta potenciais desvantagens desse concreto especial, dentre as quais se pode destacar:

- O uso de pavimentos de concreto permeável é limitado a áreas de tráfego leve; por se tratar de um material com elevado índice de porosidade, o concreto permeável apresenta resistência inferior a coberturas impermeáveis convencionais (ZHONG, LENG e POON, 2018). É possível, no entanto, adaptar normas que estabelecem parâmetros de desempenho para pavimentos de concreto, como a regulamentação croata, General Technical Conditions for Roadwork (2001), que define resistências à tração na flexão de pelo menos 5 MPa para uso em vias de tráfego muito intenso, 4,5 MPa para vias de tráfego intenso e 4 MPa para demais casos.
- Necessidade de controle tecnológico rigoroso; a tecnologia de concretos permeáveis demanda especial atenção com relação ao processo de cura, adensamento e controle da reologia do concreto.
- Inviabilidade uso da tecnologia para percolação de águas superficiais em solos argilosos, e risco de inutilização como cobertura em solos expansivos por conta da contaminação por finos ocasionada por poro pressão negativa. Segundo Virgiliis (2009), o risco de ascensão de finos é maior em pavimentos submetidos a carregamentos lentos, como garagens e estacionamentos, que

estejam apoiados sobre bases granulares sem uso de membrana geotêxtil para separação da camada porosa da camada de base.

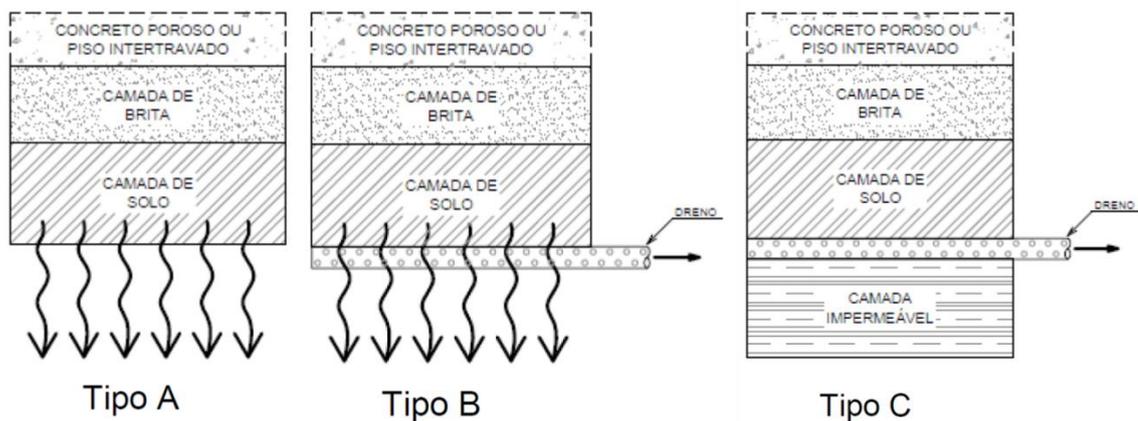
A Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP (2011) apresenta classificação de pavimentos permeáveis em função da relação entre o sistema de pavimentação drenante e a base do terreno sobre a qual o conjunto drenante será incorporado, em:

Tipo A – infiltração total da água percolada no solo da base; nesse caso, conforme pode ser observado na Figura 2.5, não há mecanismo de direcionamento da água percolada, ocorrendo infiltração total no solo. O sistema drenante com esse tipo de formatação é proposto para cobertura de solos arenosos, com boa capacidade de infiltração.

Tipo B – infiltração parcial da água percolada no solo da base; conforme a Figura 2.5, esse tipo de proposta demanda a incorporação de um tubo drenante para auxiliar no escoamento da água infiltrada, e é proposto quando o solo da base não apresenta capacidade drenante suficiente para absorver a carga pluviométrica solicitante.

Tipo C – sem infiltração da água percolada no solo da base; conforme a Figura 2.4, nesse caso, o solo tem baixíssima capacidade de absorção de água, e demanda do sistema drenante a incorporação de tubulação para captação e direcionamento de águas pluviais, e uma camada impermeável, geralmente composta por manta geotêxtil.

Figura 2.4–Tipos de sistemas drenantes.



Fonte: Adaptado de Ferreira (2017).

Verifica-se atualmente a ampla utilização de pavimentos de concreto permeável, notadamente nos Estados Unidos, principalmente em estacionamentos, calçadas e, em alguns casos, vias de tráfego leve. Na China, a proposta tem ganhado mais espaço em planos de intervenção em drenagem, principalmente a partir de 2012, quando o país iniciou o processo de implementação de projetos nas chamadas cidades-esponja. Na Europa, lideranças locais e

regionais reconhecem a aplicabilidade de concretos permeáveis como alternativa viável para problemáticas relacionadas à drenagem urbana, mas o amplo uso da tecnologia é limitado por conhecimento restrito a respeito do desempenho a longo prazo do material (ZHONG, LENG e POON, 2018).

## 2.4 COMPOSIÇÃO DO CONCRETO PERMEÁVEL

O desenvolvimento de projetos construtivos que abordem a utilização de pavimentos permeáveis como uma alternativa viável para absorção, reservação e distribuição de águas pluviais demanda alguns cuidados no que diz respeito à escolha dos materiais que irão compor a matriz de concreto. Sob esse aspecto, por tratar-se de um material composto essencialmente por agregados graúdos e pasta de cimento, é de extrema relevância a escolha de agregados que sejam compatíveis com as prerrogativas de desempenho da tecnologia, no que diz respeito à resistência, ao grau de permeabilidade desejado e à durabilidade do material.

A ACI 522R-10 (2010) recomenda a utilização de agregados com granulometria única para compor a matriz de concreto, ou a utilização de graduações que estejam compreendidas entre as faixas 9,5 mm e 19 mm de diâmetro característico. A ACI 522R-10 (2010) recomenda, ainda, a limitação de uso de agregados miúdos, para que não haja prejuízo à conectividade dos poros na matriz. Segundo recomendação C33 da ASTM, por sua vez, o tamanho de agregados normalmente utilizado para confecção de concretos permeáveis varia nos intervalos de peneiras Nº 67 (4.75 – 19.0 mm), Nº 8 (2.36 – 8.5 mm) e Nº 89 (1.18 – 9.5 mm).

Kevern Schaefer, Wang et al. (2008) e Kevern, Wang e Schaefer (2010), no entanto, realizaram estudos de misturas e desenvolvimento de concretos permeáveis, e concluíram que a adoção de granulometrias unitárias não é interessante para que sejam aprimoradas, simultaneamente, a resistência e a permeabilidade do material. Os autores concluíram, ainda, que a adição de pequenos percentuais de areia ou látex poderiam promover misturas potencialmente mais resistentes, mantendo razoável permeabilidade.

Ćosić et al. (2015) afirmam que a redução do diâmetro característico dos agregados graúdos confere maior densidade e maiores resistências à tração na flexão em concretos permeáveis, e Schaefer et al. (2006) acrescentam que a redução de diâmetro dos agregados graúdos pode minimizar em até 10% o ruído associado ao tráfego nas vias onde a cobertura permeável for instalada.

Meddah et al. (2017) concluíram que a granulometria adotada é o fator de maior influência sobre a resistência e porosidade da matriz de concreto. Yang and Jiang (2003), por sua vez, já

havia abordado, também, que a redução de diâmetro característico dos agregados teria interferência positiva sobre a resistência de concretos permeáveis, resultado da maior interação entre a área superficial dos agregados e a pasta de cimento. Chandrappa and Biligiri (2016), finalmente, apontam que maiores resistências são obtidas pela adequada proporção entre agregados graúdos e pasta de cimento.

Outras características de concretos permeáveis são influenciadas pela granulometria adotada, bem como por propriedades físicas dos agregados graúdos e o cobrimento destes pela pasta de cimento. Pode-se destacar, por exemplo, a resistência à abrasão por desgaste superficial: Tennis et al. (2004) afirmam que por conta da superfície rugosa da matriz, o material está mais suscetível ao desgaste superficial por atrito com outras coberturas, bem como ao arranque de partículas. Desse modo, alguns procedimentos preliminares de caracterização da resistência à abrasão dos grãos de agregados graúdos são necessários durante o processo de escolha de materiais.

Tennis et al. (2004) citam ainda práticas e materiais para confecção de concretos permeáveis, e afirmam que maiores resistências em concretos permeáveis são obtidas pela adoção de agregados graúdos de formato boleadado, por conta do melhor agrupamento e empacotamento dos grãos. Diversos autores abordam também a influência do tipo de agregado no desempenho de concretos permeáveis: alguns estudos apontaram que as maiores resistências podem ser alcançadas a partir da adoção de rochas de origem dolomítica (Chandrappa e Biligiri, 2016; Čosić et al., 2015; Lian, Zhuge, e Beecham, 2011).

Estão agrupados na Tabela 1 os tipos, faixas granulométricas e proporções de agregados utilizados em diversos estudos desenvolvidos nos últimos 10 anos. O levantamento bibliográfico permite verificar a ampla utilização de rochas de diversas origens como insumos para a produção de concretos permeáveis, destacando-se, entre as fontes consultadas, a ampla utilização de calcário e rocha granítica britada.

Percebe-se, também, a utilização de agregados de diâmetro característico variando em até 19 mm, além da utilização de combinações binárias e unitárias de agregados para a produção dos concretos permeáveis, em concordância com o que é estabelecido normativamente em ACI 522R-10 (2010).

Tabela 1 - Tipos, granulometrias e proporções utilizadas.

<b>AUTOR (ANO)</b>	<b>TIPO DE AGREGADO</b>	<b>DIÂMETRO (mm)</b>	<b>PROPORÇÃO</b>
Castro et al. (2009)	Rocha granítica britada	10	100
Kim e Lee (2010)	Xisto expandido, rocha granítica britada	13-19, 8-13, 4-8	100
Lian et al. (2011)	Quartzita, dolomita, calcário	13.2-4.75, 9.5-6.7, 9.5-4.75	100, 30-70, 10-60-30
Ibrahim et al. (2014)	Calcário	12.5, 9.5, 4.5	100, 50-50
Ćosić et al. (2015)	Areia, dolomita, escória de aciaria	4-16, 0-2	10-90, 30-70, 40-60
Torres, Hu, e Ramos (2015)	Calcário	9.5, 6.35	100
Meddah et al. (2017)	Calcário	20, 10	50-50, 75-25, 60-40
Souza e Carvalho (2016)	Seixo de cava	21.5, 9.5, 2.36	100, 30-70
Bechara (2017)	Rocha granítica britada	19, 12.5, 6.3, 4.75, 2.36	100, 70-30, 50-50
Silva et al. (2018)	Seixo de cava	12.5	100

Fonte: materiais consultados pelo autor.

A definição da distribuição granulométrica adequada, bem como do teor de pasta suficiente para o cobrimento dos agregados, também contribuem para a obtenção das propriedades almejadas na matriz de concreto. ACI 522R-10 (2010) especifica a adoção de misturas binárias onde o agregado de maior diâmetro não supere em mais de 2,5 vezes o diâmetro do agregado menor, afim de evitar que os agregados menores obstruam os poros que surgem entre os agregados maiores, interferindo sobre a percolação de fluidos.

Chandrappa e Biligiri (2016) estabelecem que o dimensionamento adequado da pasta de cimento tem correlação direta com o grau de cobrimento dos agregados e com a durabilidade de concretos permeáveis. ACI 522R-10 (2010) afirma que o cálculo do consumo de cimento tem como finalidade estabelecer o volume mínimo de pasta necessário para cobrir a área superficial dos agregados graúdos, bem como garantir a união entre as partículas, assegurar o percentual mínimo de vazios conectados que caracterize o material como permeável, além de conferir a resistência adequada almejada e a trabalhabilidade requerida para lançamento e moldagem. Segundo Tennis et al. (2004) e ACI 522R-10 (2010), ainda, o consumo de materiais cimentícios varia entre 270 e 415 kg/m<sup>3</sup>, e a relação água/materiais cimentícios que proporciona adequado cobrimento e estabilidade está compreendida entre 0,26 e 0,45.

Torres, Hu, e Ramos (2015) investigaram a influência da espessura do cobrimento da pasta de cimento em propriedades fundamentais de concretos permeáveis, tais como permeabilidade, resistência e porosidade. Os autores mantiveram constantes o tipo de agregado graúdo, o tipo de cimento (comum), e não foram utilizadas adições ou aditivos, afim de estabelecer a análise unicamente sobre a pasta cimentícia. Dentre as conclusões às quais os autores chegaram, pode-se destacar a influência da espessura de cobrimento da pasta sobre a permeabilidade do concreto – maiores volumes de pasta de cimento resultam em maiores camadas de cobrimento dos agregados que reduzem, naturalmente, a porosidade e a permeabilidade da matriz, podendo inclusive descaracterizar o material como permeável; e sobre a resistência mecânica – maiores volumes de pasta possibilitam maiores resistências.

Zhong e Wille (2016), por sua vez, abordaram a influência da presença de microporos da pasta de cimento sobre a resistência de concretos permeáveis. Os autores concluíram que a resistência à compressão em concretos permeáveis não é função somente do teor de pasta ou da porosidade do material, mas também da resistência da matriz de cimento, que por sua vez é influenciada pela porosidade da pasta e tamanho dos agregados graúdos.

Xu et al. (2018), por sua vez, defendem que a incorporação de componentes finos à mistura de concretos permeáveis, de diâmetro característico compreendido entre 1/6 e 1/10 do diâmetro dos agregados graúdos, não interfere sobre as propriedades de percolação de fluidos na matriz, e ainda contribui para o fortalecimento da ligação agregado-pasta-agregado.

Com relação ao uso de adições minerais e aditivos, a norma norte-americana ACI 522R-10 (2010), bem como as informações levantadas junto a Tennis et al. (2004), estabelecem que o uso de materiais com propriedades pozolânicas, tal como a cinza volante, por exemplo, são comuns e podem ser utilizados em adição ao cimento Portland normalmente utilizado na dosagem de concretos permeáveis, desde que tomados os devidos cuidados de adequação e compatibilização dos materiais. Estudo desenvolvido por Fu et al. (2014), por exemplo, apontou aumento de resistência em concretos permeáveis com substituição de até 10% de sílica ativa, e efeito contrário para substituições de 20 e 30%.

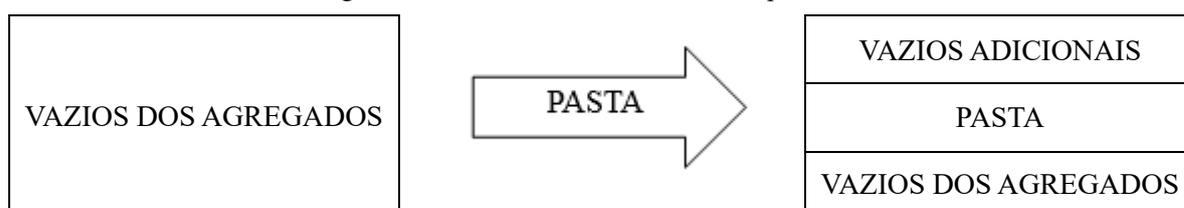
ACI 522R-10 (2010) recomenda ainda o uso de materiais que reduzam o consumo de água e possibilitem maior trabalhabilidade ao material que por ter baixa razão a/c, apresenta baixíssimo espalhamento em procedimentos experimentais padronizados, como pode ser observado no teste de abatimento em tronco de cone Abrams. Por essa razão, inclusive, que o abatimento de cone de Abrams não deve ser usado como parâmetro de trabalhabilidade ou compatibilidade de uma mistura fresca de concreto permeável.

Segundo a normativa americana, ainda, aditivos plastificantes e retardadores de pega tem também a finalidade de aumentar o tempo de manuseio do material antes do lançamento e moldagem. A preocupação em aumentar o tempo de trabalhabilidade do concreto é justificável, visto o acelerado processo de hidratação e enrijecimento do material, o que pode ser grande empecilho para o sucesso do processo de moldagem. Deve-se levar em conta a umidade e a temperatura da região de implantação, além de garantir que toda a área esteja desobstruída, limpa e preparada para receber a camada permeável. Além disso, deve-se levar em conta o tempo de espalhamento, adensamento e nivelamento do material.

## 2.5 POROSIDADE EM CONCRETOS PERMEÁVEIS

Um dos principais fatores que influenciam as propriedades hidráulicas e mecânicas de concretos permeáveis é a porosidade do material, ou seja, o percentual de vazios incorporados à sua estrutura (ZHONG et al. 2018). Castro et al. (2009) estabelecem que a porosidade total em concretos permeáveis é definida pela relação entre os vazios iniciais dos agregados graúdos, a pasta de cimento e os vazios incorporados pela pasta, conforme a Figura 2.5. Estudos e normas especializadas recomendam que o teor de vazios em concretos permeáveis esteja compreendido no intervalo de 15 a 35% do volume total da matriz de concreto (ACI 522R-10, 2010; COSIC et al. 2015; LEE et al. 2016; ZHONG et al. 2018). Esses parâmetros de porosidades são importantes para que se possa garantir as propriedades drenantes do material.

Figura 2.5 - Vazios na matriz de concreto permeável.



Fonte: Adaptado de Castro et al. (2009).

A norma americana ACI 522R-10 (2010) destaca que as propriedades de concretos permeáveis, tais como permeabilidade e resistência, dependem sumariamente do grau de porosidade da matriz de concreto. A porosidade, por sua vez, depende do teor de pasta, da relação  $a/c$ , do nível de compactação e de propriedades físicas e de distribuição granulométrica dos agregados utilizados. ACI 522R-10 (2010) estabelece que a porosidade é fortemente dependente também da graduação granulométrica, do teor de pasta, da relação água/materiais cimentícios e esforço de compactação. Cosic et al. (2015), por sua vez, concluem que a

porosidade é mais fortemente influenciada pelo tipo de agregado graúdo utilizado que pelo diâmetro característico dos agregados.

A porosidade total de um concreto permeável pode ser caracterizada pelo somatório de poros isolados e abertos, podendo ser calculada por meio de pesagem hidrostática (ĆOSIĆ et al. 2015). Lian et al. (2011) apontam que a estrutura porosa pode ser caracterizada em função da conectividade dos poros, de seu tamanho, da fração volumétrica e rugosidade superficial. Em relação ao tamanho dos poros, Torres et al. (2015) apontam que o diâmetro de poros em concretos permeáveis é governado fundamentalmente pela relação entre o tamanho dos grãos e pela espessura da pasta de cimento que recobre os grãos.

Por ser um material com grande volume de poros, além de elevado percentual de poros conectados, não se pode realizar em concretos permeáveis os mesmos procedimentos experimentais de definição de poros que são usados para concretos convencionais – como o procedimento de intrusão de mercúrio, por exemplo, regulamentado pela ASTM D4404 (ZHONG et al., 2018). Desse modo, diversos procedimentos de caracterização de poros quanto à conectividade, volume, diâmetro e esfericidade, por exemplo, foram desenvolvidos. Destacam-se metodologias de análise de imagens através de programas computacionais, bem como procedimentos específicos para caracterização das principais propriedades identificadas nos poros internas da matriz de concreto (LIAM et al., 2010).

Finalmente, por conta da elevada porosidade, concretos permeáveis apresentam massa específica normalmente inferior a concretos convencionais. Segundo Tennis et al. (2004), a massa específica de concretos permeáveis depende dos materiais utilizados na mistura e do esforço de compactação, e é normalmente compreendida entre  $1600 \text{ kg/m}^3$  e  $2000 \text{ kg/m}^3$  em concretos compactados *in loco*.

## 2.6 PERMEABILIDADE

A permeabilidade pode ser definida como a capacidade de percolação de um fluido pela estrutura interna de um material ou, em outras palavras, como uma “propriedade do meio poroso que traduz a rapidez com que determinado líquido atravessa esse meio (SUZUKI, AZEVEDO e KABBACH JÚNIOR, 2013), e é uma característica fundamental de pavimentos drenantes. As camadas do pavimento devem ser permeáveis o suficiente para garantir o escoamento de águas superficiais, bem como o direcionamento adequado, seja para o lençol freático ou para estruturas de retenção, armazenamento e distribuição.

Tennis et al. (2004) estabelecem que a taxa de percolação em concretos permeáveis depende da porosidade que, por sua vez, é diretamente afetada pelas propriedades e proporções dos materiais utilizados, bem como os procedimentos de confecção, lançamento e adensamento das camadas do pavimento drenante. Segundo os autores, a taxa de percolação em concretos permeáveis é geralmente compreendida no intervalo de 120 a 320 L/m<sup>2</sup>/min, podendo variar conforme o processo de escolha de materiais e métodos de confecção.

ACI 522R-10 (2010) recomenda alguns cuidados para o sucesso de utilização de pavimentos drenantes, dentre os quais se pode destacar a atenção com a taxa de percolação do solo, para casos em que se deseja desenvolver sistemas com percolação direta das camadas drenantes para leitos subterrâneos. A norma destaca que a capacidade de percolação de uma camada drenante está diretamente relacionada ao índice de vazios na matriz e é, portanto, inversamente proporcional à resistência do material.

O grau de permeabilidade em concretos permeáveis é representado pelo coeficiente  $k$ , que por sua vez relaciona, tendo como fundamento a lei de Darcy de percolação de fluidos através de materiais submetidos a determinados gradientes hidráulicos, o tempo relativo à infiltração da água pela camada drenante.

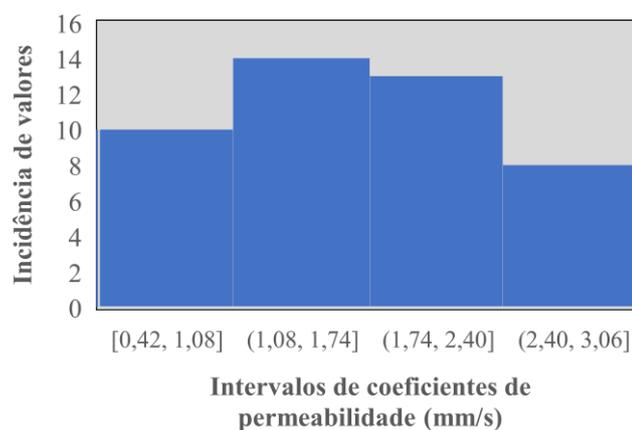
Os valores definidos para coeficientes de permeabilidade em concretos permeáveis variam de  $1,0 \times 10^{-3}$  a  $1,4 \times 10^{-3}$  m/s (ACI522R-06, 2006; NBR 16416, 2015). Para Marchioni e Silva (2011) o valor de  $K \geq 1,40 \times 10^{-3}$  m/s proporciona um fator de segurança que garante o funcionamento hidráulico por toda vida útil do pavimento, levando em conta que o concreto permeável irá sofrer colmatção<sup>4</sup> ao longo do tempo. Valores inferiores a este intervalo de referência apresentam permeabilidade muito baixa, dificultando a infiltração de água e reduzindo a vida útil do pavimento.

---

<sup>4</sup> A colmatção em concretos permeáveis é abordada em diversos estudos, e corresponde à perda de capacidade de percolação de um fluido através da matriz porosa, ocasionada pelo entupimento de poros superficiais (superiores ou inferiores) com resíduos sólidos e compostos químicos. A colmatção, apesar de não ser foco desse estudo, é um dos principais parâmetros de funcionalidade e durabilidade de pavimentos permeáveis (XIE, AKIN e SHI, 2019). Valenski e Chandler (2015) avaliaram diversas coberturas porosas, e constataram que superfícies submetidas a intensas variações de sollicitação mecânica, esforços de abrasão, bem como superfícies normalmente atingidas por águas superficiais extremamente contaminadas com resíduos, tendem a perder capacidade de percolação de fluidos com o tempo. Tal conclusão corrobora para a limitação de uso de pavimentos permeáveis em vias de tráfego menos intenso, estacionamento, garagens e calçadas, uma vez que o uso da tecnologia em vias de tráfego intenso submeteria as coberturas a processos de deterioração e colmatção superficial de modo expressivo.

Foram coletados 45 resultados de permeabilidade, obtidos a partir de 4 estudos (BHUTTA, TSURUTA, e MIRZA, 2012; IBRAHIM et al., 2014; SULEIMAN et al., 2006; TORRES et al., 2015). Os resultados estão agrupados no histograma da Figura 2.6. É possível observar que os valores apresentados variam de 0.42 a 3.06 mm/s.

Figura 2.6 – Histograma de coeficientes de permeabilidade.



Fonte: Bhutta, Tsuruta, e Mirza, 2012; Ibrahim et al., 2014; Suleiman et al., 2006; Torres et al., 2015.

A permeabilidade de concretos permeáveis é relacionada ao percentual de vazios conectados na matriz de concreto, ou porosidade efetiva (BHUTTA et al. 2012; LIAN et al. 2011; MEDDAH et al. 2017; XU et al. 2018; ZHONG e WILLE 2015). Na prática, o conceito estará relacionado à capacidade de percolação de águas pluviais do sistema drenante.

Grubeša et al. (2018) realizaram estudo da capacidade drenante de concretos permeáveis com agregados graúdos de três origens distintas - dolomita, diabásico e escória de aciaria, variando a composição granulométrica em dois níveis, 4-8 mm e 8-16 mm, com incorporação de 10% de areia. Os autores concluíram que diabásico proporcionou à matriz de concreto maior potencial drenante, devido às arestas pontiagudas do agregado que permitem que a água escoe suavemente.

Ibrahim et al. (2013), por sua vez, realizaram estudo de permeabilidade em concretos permeáveis utilizando diâmetro único e combinações binárias de agregados graúdos. Os autores concluíram que o diâmetro característico dos agregados graúdos pode influenciar nas propriedades de percolação de fluidos em concretos permeáveis, devido às variações na massa específica da matriz de concreto: maiores massas específicas representam menor percentual de poros e, conseqüentemente, menor permeabilidade.

Nota-se, a partir da análise de resultados diversos obtidos na literatura, que a capacidade drenante de concretos permeáveis e sistema drenantes depende da origem e diâmetro

característico dos agregados utilizados, do teor de pasta, do modo de adensamento – a carga aplicada pelo equipamento de adensamento, a utilização ou não de quaisquer mecanismos de vibração, uma vez que esses parâmetros estarão diretamente relacionados à porosidade total e efetiva da matriz de concreto.

## 2.7 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas de pavimentos permeáveis interferem diretamente sobre a aplicabilidade e na durabilidade do sistema drenante. Tennis et al. (2004) estabelecem que a resistência à compressão em concretos permeáveis varia entre 3.5 e 28 MPa, e serve a diversas finalidades de uso da cobertura permeável. Quanto à resistência à tração na flexão, os valores variam de 1 a 3.8 MPa.

Entre os diversos fatores que influenciam a resistência de concretos permeáveis, pode-se destacar: a razão água/materiais cimentícios, o teor de pasta utilizado, propriedades mecânicas dos materiais utilizados, faixas granulométricas e metodologia adotada para o adensamento (FU et al. 2014; KEVERN, SCHAEFER, e WANG 2011; NEPTUNE e PUTMAN 2010; XIE et al. 2019; ZHENG, CHEN, e WANG 2012).

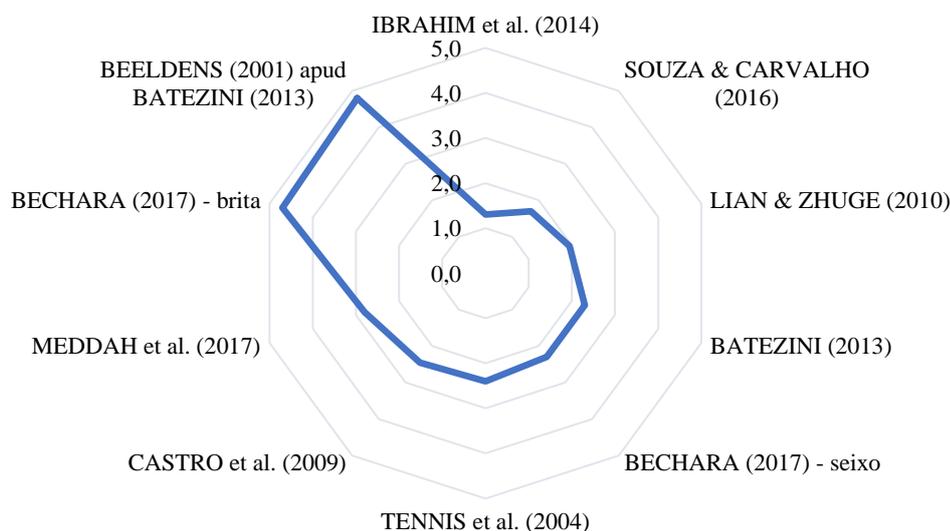
Chandrappa e Biligiri (2016) destacam propriedades mecânicas relevantes para concretos permeáveis, tais como resistência à compressão, resistência à tração na flexão, fadiga e desgase superficial por abrasão. Pode-se acrescentar ainda a resistência superficial das partículas, que deve garantir que não haja descolamento superficial dos agregados graúdos, ocasionado pela instabilidade da mistura e baixa espessura da pasta de cimento. Os autores apontam diversos estudos que indicam as variáveis que mais influenciam sobre a resistência de concretos permeáveis, e destacam a relação pasta/agregados com um fator extremamente relevante no desempenho do material.

Brake, Allahdadi, e Adam (2016) realizaram estudo para avaliar a influência do tamanho de grãos e da massa unitária sobre a resistência à tração na flexão de concretos permeáveis, bem como a energia de fratura inicial e final. Os autores concluíram que dentre as variáveis analisadas, a massa unitária, representada indiretamente pelo percentual total de vazios da matriz de concreto, é o fator de maior relevância sobre a resistência de concretos permeáveis nos parâmetros analisados.

A NBR 16416 (ABNT, 2015) define espessuras e resistências mínimas das camadas de concreto permeável em função da finalidade de uso, que vão de 60 a 100 mm, e de 1 a 3,5 MPa, respectivamente. O gráfico da Figura 2.7 agrupa resistências à tração na flexão obtidas por

alguns autores consultados. Os resultados variam de 1 MPa a 5 MPa, o que possibilitaria, em hipótese mais positiva, a utilização da tecnologia até mesmo para apaziguar ruído e reduzir a taxa de escoamento superficial em vias de tráfego mais intenso.

Figura 2.7 - Resultados máximos de resistência à tração na flexão na bibliografia consultada, em MPa.



Fonte: Bibliografia consultada pelo autor.

## 2.8 GRAU DE EMPACOTAMENTO EM CONCRETOS PERMEÁVEIS

As técnicas de adensamento utilizadas no processo de moldagem de concretos permeáveis apresentam grande interferência sobre as propriedades hidráulicas, mecânicas e durabilidade do pavimento drenante: Tennis et al. (2004) apontam que o uso de agregados graúdos de formato boleado/não alongado tem potencial de proporcionar misturas mais resistentes, justamente pelo maior potencial de compactação do esqueleto granular, fortemente condicionada pelo formato característico dos grãos – sub-arredondados, pontiagudos – e por sua rugosidade superficial. Tal constatação fora reafirmada por Chandrappa e Biligiri (2018).

Suleiman et al. (2006) identificaram a influência da energia de compactação sobre diversas propriedades do concreto permeável, tais como a resistência, massa específica, permeabilidade e percentual de vazios; os autores concluíram que energias de compactação mais intensas conferem matrizes mais densas, menos porosas e conseqüentemente mais resistentes, com maior massa específica e menor potencial de percolação de fluidos.

A durabilidade das coberturas permeáveis, por sua vez, sofre grande influência do teor de pasta e da relação água/materiais cimentícios. Estudos de durabilidade em coberturas de pavimentos permeáveis de concreto identificam que as patologias mais frequentemente observadas nesse tipo de material são a deterioração das juntas de dilatação, o descolamento dos agregados superficiais e a colmatação superficial, decorrente do acúmulo de resíduos sólidos. A ACI 522R-10 (2010) aborda alguns procedimentos para correção de patologias em coberturas de concreto permeável, e destaca que a colmatação dos poros superficiais pode ser corrigida com varredura e lavagem por hidro jateamento, e esse procedimento pode recuperar até 50% da capacidade de drenagem inicial do material.

Zhong e Wille (2018) realizaram estudo para determinar a relação entre características dos poros em concretos permeáveis e sua durabilidade; os autores concluíram que a durabilidade do material é fortemente influenciada pelo tamanho dos poros e pela tortuosidade da matriz, associando-os principalmente a fraturas ocasionadas pelo ciclo de gelo-degelo de água retida na matriz de concreto. Segundo os autores, a tortuosidade <sup>5</sup>afeta a durabilidade do material na medida em que ocasiona maior distância de percolação de águas infiltradas e, como consequência, maiores pressões hidráulicas internas.

Em estudos preliminares realizados no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal do Pará, onde foram desenvolvidas misturas de concretos permeáveis utilizando seixo de cava como agregado graúdo, verificou-se a dificuldade em atingir valores de resistência compatíveis com o que a NBR 16416 (ABNT, 2015) estabelece como requisito mínimo de desempenho do material para tráfego de veículos leves (2 MPa). Por outro lado, as misturas desenvolvidas não apresentaram problemas referentes ao coeficiente de permeabilidade estabelecido normativamente, revelando desequilíbrio entre a distribuição dos dois parâmetros básicos – resistência e permeabilidade.

No caso dos estudos preliminares, a baixa aderência dos grãos à pasta foi associada primordialmente à baixa rugosidade superficial dos grãos de seixo, conforme constatado por

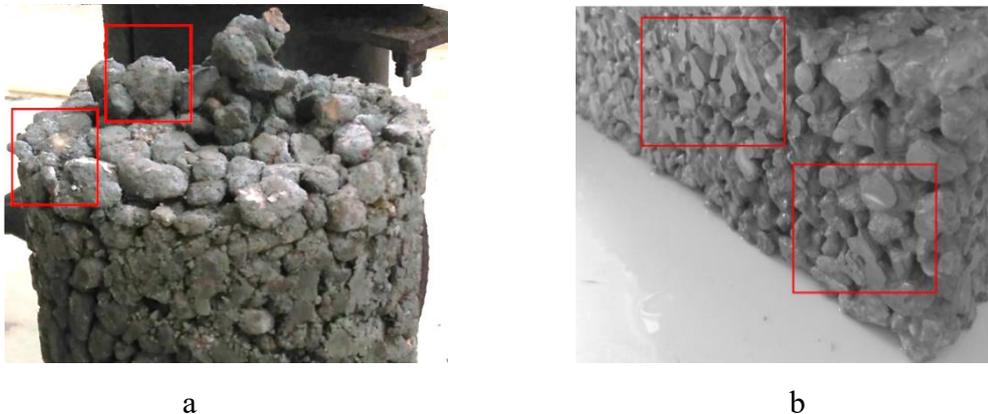
---

<sup>5</sup> Em sistemas porosos, a tortuosidade é definida como a razão entre a trajetória real dos poros, de uma extremidade à outra, e a distância em linha reta entre as extremidades. Em concretos permeáveis, a tortuosidade está relacionada com a facilidade de percolação de fluidos através da matriz de concreto, podendo ser relacionada com a permeabilidade através da equação de Kozeny-Carman, que estabelece a permeabilidade como função de quatro parâmetros básicos: a porosidade, a área superficial específica, o fator de forma (shape) e a tortuosidade hidráulica (MATYKA & KOZA, 2012). Chandrappa e Biligiri (2017) identificaram que a tortuosidade aumenta com o aumento da porosidade e permeabilidade, e reduz com o aumento da área superficial e do raio dos poros.

Trigo (2012), o que gerou misturas menos coesas e com travamento substancialmente inferior ao que seria desejável para gerar misturas permeáveis e potencialmente resistentes. Além disso, grãos de seixo de cava disponíveis na região são demasiadamente abrasivos, ou seja, apresentam baixa resistência mecânica ao desgaste superficial por abrasão, o que potencializa a baixa resistência das amostras de concreto permeável com esse material como agregado graúdo.

Percebeu-se ainda o elevado grau de descolamento de agregados superficiais (Figura 2.9.a), revelando a baixa aderência do conjunto agregado-pasta. Foi possível verificar também, em estudos-piloto que tiveram o método de Castro et al. (2009) como mecanismo de dosagem, a dificuldade em estabelecer o teor ótimo para a relação espessura de pasta/área superficial dos agregados graúdos, e para a relação água/materiais cimentícios, resultando em misturas hora com baixo teor de pasta, hora com pasta em excesso, sendo a primeira problemática observada no não cobrimento integral dos agregados (Figura 2.8.a, esquerda), e a segunda problemática no aparecimento de efeito-parede (Figura 2.8.b, direita).

Figura 2.8 -a) Amostra de concreto com descolamento superficial e baixo teor de pasta (esquerda); b) e amostra com elevado teor de pasta, ocasionando efeito-parede (direita).



Fonte: o autor.

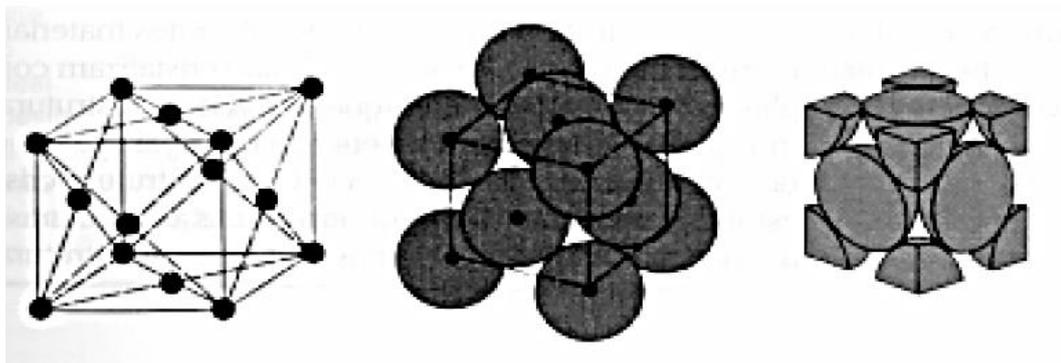
Apesar das limitações mecânicas, tal insumo é vastamente consumido em diversas finalidades da construção civil. Entende-se, desse modo, que o sucesso de aplicação de concretos permeáveis que utilizem seixo de cava como agregado graúdo, tornando o processo de produção mais sustentável e menos oneroso, depende do desenvolvimento de misturas que compatibilizem a granulometria, o empacotamento, o teor de pasta e a relação água/materiais cimentícios, que são fatores que interferem fortemente sobre a resistência de pavimentos drenantes porosos.

## 2.9 MÉTODO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL

O Método de Empacotamento Compressível (MEC), desenvolvido por Larrard (1999), é uma proposta de modelagem matemática baseada na definição de uma curva granulométrica ideal, ou seja, que proporcione o empacotamento ótimo dos grãos, considerando fatores como forma e diâmetro dos agregados, além da técnica utilizada para adensamento da mistura.

O MEC baseia-se na definição de uma compacidade ótima teórica - a compacidade que seria obtida se agrupássemos grão a grão, organizando-os de modo não aleatório. O autor exemplifica o agrupamento teórico de esferas de diâmetro único, no qual seria obtida a máxima compacidade possível para estruturas desse tipo, 0,74, em arranjo similar à organização de estruturas cristalinas do tipo cúbica de face centrada (CFC), conforme observa-se na Figura 2.9. Do mesmo modo, se as partículas agrupadas fossem todas cúbicas, o agrupamento equivaleria a 1,0 de compacidade.

Figura 2.9 - Exemplo de agrupamento em esferas de mesmo diâmetro, semelhante à organização de estruturas cristalinas do tipo CFC.



Fonte: Silva (2004).

Deve-se considerar, no entanto, que a compacidade real será sempre inferior à compacidade virtual (teórica), por conta do agrupamento aleatório entre as partículas. Desse modo, pode-se correlacionar porosidade e índice de vazios para determinado agrupamento aleatório como sendo:

$$e = \frac{\pi}{C} \quad (1)$$

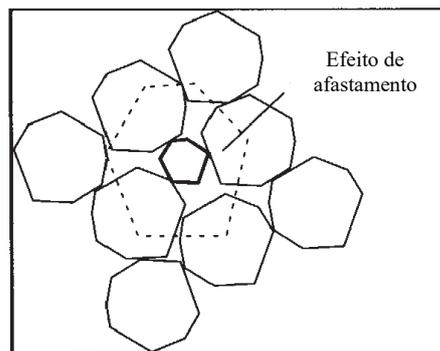
No qual  $e$  é o índice de vazios,  $\pi$  é a porosidade e  $C$  é a densidade de empacotamento. Do mesmo modo, a porosidade pode ser obtida pela diferença entre um empacotamento ideal igual a 1 e a densidade de empacotamento. Deve-se diferenciar a compacidade real/experimental ( $C$ ) da compacidade virtual ( $\gamma$ ).

O autor estabelece diversas relações possíveis entre as misturas granulométricas (mistura binária sem interação entre partículas, misturas binárias com interação entre partículas, mistura polidispersa composta de N classes monodispersas, mistura polidispersa composta por M materiais, sendo cada material correspondente a uma mistura polidispersa composta por N classes). Será utilizada, para as misturas propostas nesse estudo, a relação granulométrica do tipo “Mistura binária com interação parcial entre partículas”. A escolha é relacionada à interação entre os grãos que serão utilizados no estudo.

Em uma mistura binária, primeiramente deve-se conhecer a compacidade virtual de cada classe, individualmente, representada por  $\beta$ . As frações volumétricas, por sua vez, são representadas por  $y$ , sendo  $y_1$  a fração referente à classe granular dominante, e  $y_2$  referente à classe granular secundária. A soma das frações volumétricas das duas classes equivale à totalidade volumétrica 1.

Na mistura binária com interação parcial entre as partículas, considera-se que a classe dominante possui diâmetro maior que a classe secundária ( $d_1 > d_2$ ). Nessa interação, observa-se a ocorrência de dois fenômenos entre a classe dominante e a classe secundária: efeito de afastamento e efeito-parede. O afastamento ocorre quando os grãos da classe secundária são maiores que os vazios internos entre os grãos da classe dominante, conforme pode ser observado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Efeito de afastamento entre os grãos da classe dominante.



Fonte: Adaptado de Larrard (1999)

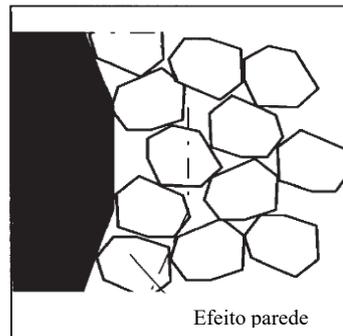
O efeito de afastamento diz respeito ao deslocamento que os grãos da classe dominante sofrem pela inserção das partículas da classe secundária. A compacidade da mistura será, portanto, definida conforme a equação 2:

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{1 - \left(1 - \frac{\alpha_{12}\beta_1}{\beta_2}\right)y_2} \quad (2)$$

Com  $a_{12}$  sendo coeficiente de afastamento,  $\beta$  a compacidade de cada classe e  $y_2$  a fração volumétrica da classe secundária.

O efeito-parede ocorre quando grãos da classe secundária se agrupam em torno de um grão da classe dominante, formando uma barreira em torno da partícula de maior diâmetro, conforme observado na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Fenômeno de efeito-parede em torno de um grão da classe dominante.



Fonte: Adaptado de Larrard (1999)

Desse modo, é inserida outra constante, relacionada à ocorrência do efeito-parede, e a compacidade da mistura é dada pela equação 3, a seguir:

$$y_2 = \frac{\beta_2}{1 - [1 - \beta_2 + b_{21}\beta_2 \left(1 - \frac{1}{\beta_1}\right)]y_1} \quad (3)$$

Onde  $b_{21}$  é o coeficiente de ocorrência de efeito-parede nas interações granulométricas. A compacidade a ser adotada é o menor entre os dois valores calculados. As compacidades serão correlacionadas em função do índice de compactação K, tabelado, que é associado ao método de compactação adotado. Os coeficientes de interação a e b também podem ser obtidos a partir de valores deduzidos para misturas experimentais binárias, em função da razão dos diâmetros.

As variáveis a e b podem ser obtidas por meio de relações com os diâmetros dos agregados utilizados, conforme as equações a seguir:

$$a_{12} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i}\right)^{1,02}} \quad (4)$$

$$b_{21} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j}\right)^{1,5} \quad (5)$$

Onde  $d_i$  representa o diâmetro máximo da classe dominante na mistura binária, e  $d_j$  representa o diâmetro máximo da classe secundária.

Partindo de um valor conhecido de  $K$ , realizam-se ensaios para determinação de  $C$  para cada granulometria, e então é calculado o  $\beta$  individual, conforme a equação 4:

$$\beta = \frac{1 + K}{K} * C \quad (6)$$

Pode-se então calcular valores de compacidade em função dos teores granulares com os quais se deseja trabalhar, afim de obter uma curva granulométrica de compacidade em função de teores adotados.

Em consequência, os procedimentos para obtenção da curva de compacidade são:

- 1) Determinação do modo de compactação dos conjuntos granulares;
- 2) Determinação da compacidade real de cada conjunto granular;
- 3) Determinação do  $\beta$  de cada grupo granulométrico com o uso da equação 4;
- 4) Cálculo das compacidades para cada proporção escolhida;
- 5) Plotagem em gráfico de Compacidade x proporção granulométrica.

A combinação que resultar no maior valor de compacidade será utilizada para dimensionamento do consumo de cimento de cada traço de concreto permeável. Destaca-se que a utilização de parte da metodologia proposta por Larrard (1999) tem como objetivo a combinação de frações granulométricas que proporcionem o maior empacotamento dos grãos antes da dosagem do consumo de cimento e de água. Apesar de não ser um recurso normalmente aplicado na dosagem desse tipo de concreto, acredita-se que seja uma alternativa viável para dimensionar produtos mais resistentes, que tem grande potencial de viabilizar misturas mais duráveis, mantendo as particularidades drenantes desse concreto especial.

## 2.10 MÉTODO DE DOSAGEM PARA CONCRETOS PERMEÁVEIS

Há, na literatura, algumas metodologias de dosagem de pavimentos permeáveis de concreto (ACI 522R-10, 2010). O Método de dosagem proposto por Castro et al. (2009) para o dimensionamento de misturas de concreto permeável trata de diversas variáveis que influenciam fortemente o comportamento do material, tais como o fator de compactação (FC) e o percentual de vazios conectados da mistura. Por isso, decidiu-se utilizar esse método para o dimensionamento das misturas de concreto utilizadas neste estudo.

A metodologia de Castro et al. (2009) parte da razão água/cimento, da massa específica dos materiais utilizados e do índice de vazios conectados na mistura seca como fatores de entrada para determinação do consumo de cimento, conforme a equação abaixo.

$$C_c (kg) = \left[ \frac{(10Va - 1000)FC + 965,48 - 11,14Vr}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \left(\frac{w}{c}\right) + \frac{Dad}{100\gamma_{ad}}\right)FC} \right] \quad (7)$$

Na qual:

- Va é o volume de compactação; ou seja, a porcentagem de vazios inicial, considerando somente os vazios no volume de agregado graúdo;
- FC é o fator de compactação, fixado em 0,95. Segundo Castro et al. (2009), o fator de compactação pode variar entre 0,84 e 0,99, e depende principalmente da razão água/cimento, devendo ser, portanto, recalculado após a realização dos ensaios;
- Vr é a porcentagem teórica de vazios;
- $\gamma_c$  é a massa específica do cimento;
- $\gamma_{ad}$  é a massa específica do aditivo (no desenvolvimento dos traços, não foi utilizado nenhum tipo de aditivo);
- w/c é a razão água/cimento;
- Dad é a dosagem do aditivo expressa como porcentagem do peso do cimento.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

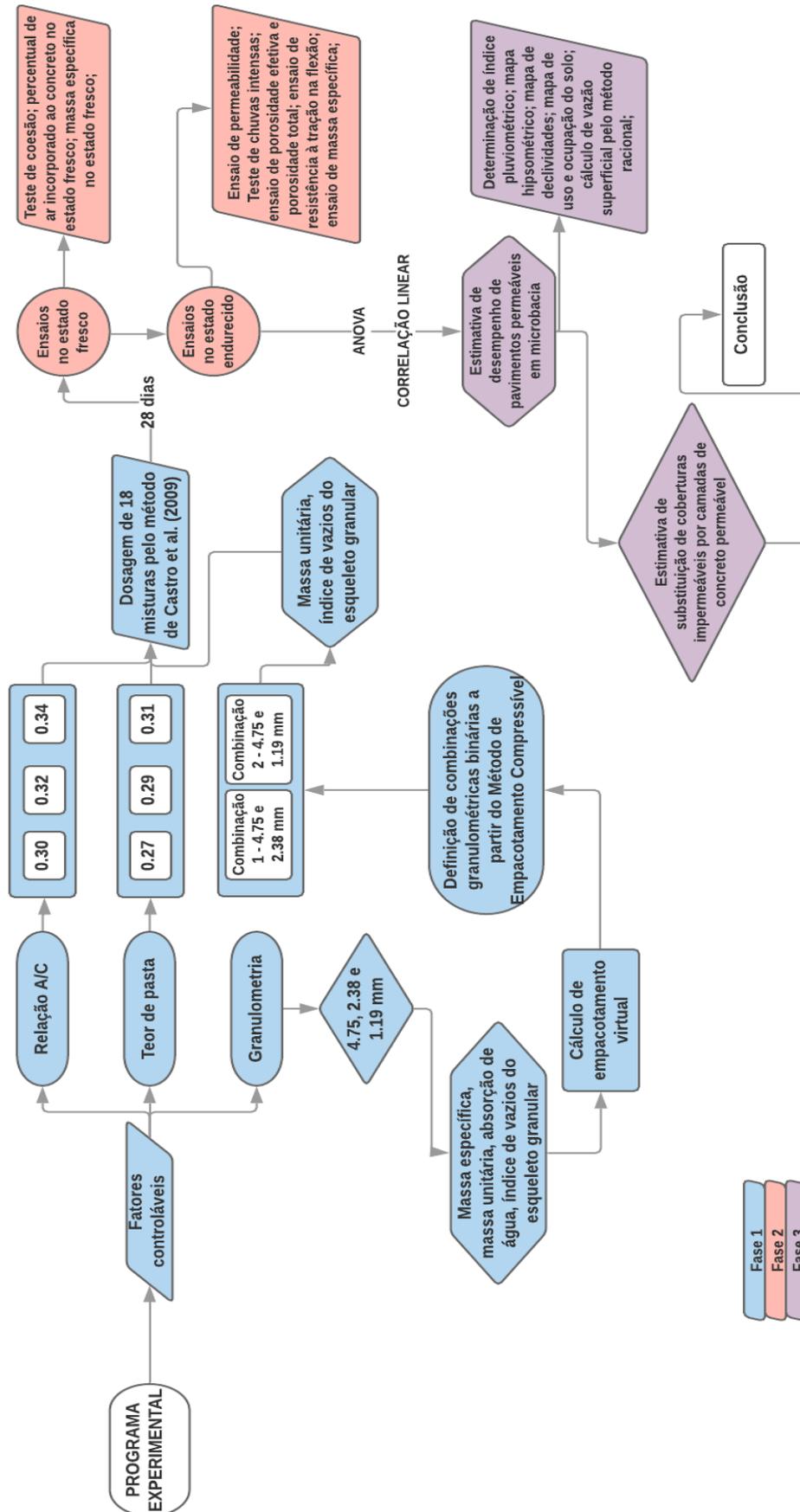
O programa experimental deste trabalho tem como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica de concretos permeáveis de seixo de cava em regiões com intenso regime pluviométrico, atrelado à obtenção de matrizes de concreto com desempenho dentro dos parâmetros estabelecidos pela normativa nacional para tráfego de veículos leves. Para isso, tomou-se como estratégia de pesquisa a definição de variáveis de controle que apresentassem grande relevância sobre as propriedades mecânicas e hidráulicas de concretos permeáveis: a granulometria – a partir de duas combinações binárias de agregados, o teor de pasta (0.27, 0.29 e 0.31) e a relação a/c (0.30, 0.32 e 0.34). As faixas escolhidas levaram em consideração levantamentos obtidos junto a estudos de dosagem prévios (CASTRO et al, 2009; SOUMINIHAC et al., 2007).

As combinações granulométricas foram definidas a partir de 3 faixas de diâmetro (4.75, 2.38 e 1.19 mm). Definiu-se combinações granulométricas em função do grau de compacidade das misturas, conforme estabelecido pelo Método de Empacotamento Compressível (LARRARD, 1999). Desenvolveu-se 18 misturas, com uso do método de dosagem para concretos permeáveis proposto por Castro et al. (2009). As amostras foram avaliadas quanto à performance mecânica e hidráulica, configuração, distribuição e dimensões de poros superficiais e internos, e comportamento em situações de chuvas intensas características desta região.

Realizou-se análise de variância ANOVA entre os 3 fatores controláveis desse estudo, com intervalo de confiança de 95%, afim de avaliar a influência de cada fator, bem como da combinação entre os fatores controláveis, sobre os resultados obtidos. Foram realizadas, ainda, correlações lineares  $r$  de Pearson, com a finalidade de avaliar a intensidade das interações entre os resultados experimentais. Por último, realizou-se estimativa de relevância percentual da utilização de coberturas drenantes de concreto permeável sobre a redução do escoamento superficial, em microbacia intensamente urbanizada e impermeabilizada de Belém, com índices crescentes de inundações e alagamentos.

O estudo dividiu-se, portanto, em três etapas, das quais a primeira comporta testes preliminares para o desenvolvimento de misturas granulares, a segunda, todos os procedimentos experimentais, e a terceira etapa diz respeito à estimativa de substituição de coberturas impermeáveis por pavimentação drenante de concreto permeável, considerando os resultados experimentais obtidos. Detalha-se na Figura 3.1 o programa experimental deste projeto:

Figura 3.1 – Programa experimental.



Fonte: o autor (2019).

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 CIMENTO

Optou-se por utilizar o cimento Portland CP II E 32, pela composição básica de 6% a 34% de escória granulada de alto forno, o que confere ao material menor calor de hidratação, conforme observado na NBR 16697 (ABNT, 2018). Em concretos permeáveis, onde a relação água/cimento é inferior a concretos convencionais, é desejável que se tenha menores calores de hidratação da pasta de cimento, afim de evitar retração e o surgimento de microfissuras. Cimentos CP II E também apresentam maior resistência ao ataque de sulfatos presentes no solo, contribuindo, desse modo, para a durabilidade do concreto. A Tabela 2 reúne propriedades do material, com os respectivos parâmetros fornecidos pelo fabricante, e os mesmos parâmetros obtidos por meio de ensaios de caracterização.

Tabela 2 - Propriedade físicas e químicas do cimento CP II E 32.

CP II E 32	FORNECIDO	NORMAS	OBTIDO
Massa específica	-	NBR NM 23	3,1097
Área específica cm <sup>2</sup> /g	>2600	NBR NM 76	-
Tempo de início de pega h/min	>1	NBR NM 65	-
Tempo de fim de pega h/min	<10	NBR NM 65	-
Índice de finura			-
Resistência à compressão 7 dias MPa	>20	NBR 7215	-
Resistência à compressão 28 dias MPa	>32	NBR 7215	-
Resíduo insolúvel (%)	<2,5	NBR 5744	-
Trióxido de enxofre SO <sub>3</sub> (%)	<4,0	NBR 5745	-

Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP (2011).

#### 3.1.2 AGREGADOS

O agregado graúdo utilizado nesse estudo foi o seixo de cava comercialmente disponível no município de Belém. Realizou-se os seguintes ensaios, para caracterização preliminar dos agregados: Ensaio de composição granulométrica (NBR NM 248 (ABNT) 2003), massa específica (NBR NM 53 (ABNT) 2009), massa unitária (NBR NM 45 (ABNT) 2006), percentual de vazios (NBR NM 45, 2006), taxa de absorção de água (NBR NM 53, 2009), ensaio de abrasão “Los Angeles” (NBR NM 51, 2001) e grau de esfericidade a partir do método de PDI, com uso do programa ImageTool. O procedimento foi escolhido por representar com moderada precisão a área e diâmetro dos agregados, possibilitando a verificação do índice de

esfericidade dos grãos (roundness), fator que interfere diretamente sobre o grau de compacidade da mistura granular. Os resultados podem ser consultados na Tabela A1 do anexo A.

### **3.1.3 ÁGUA**

Foi utilizada água potável disponibilizada pela Companhia responsável pela distribuição de água na região que, segundo Silva (2010), possui valores de pH variando entre 5 e 5.5 e é, portanto, ácida.

## **3.2 MÉTODO**

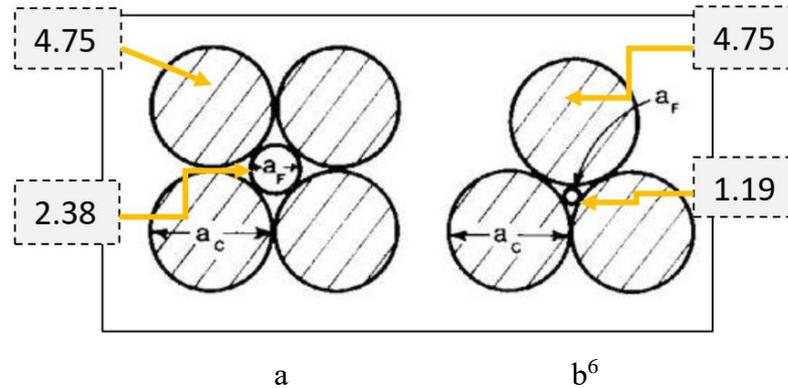
### **3.2.1 ESTUDO DO EMPACOTAMENTO VIRTUAL**

Com o intuito de promover o incremento de resistência aos concretos permeáveis confeccionados neste estudo, mantendo-se o potencial de permeabilidade das matrizes de concreto, realizou-se inicialmente um estudo do empacotamento virtual dos grãos de seixo, a fim de utilizar, nas misturas, combinações granulométricas que apresentassem maior compacidade.

A metodologia adotada nesta fase foi o Método de Empacotamento Compressível proposto por Larrad (1999), que oferece parâmetros teóricos como efeito de afastamento, efeito-parede e compacidade experimental, necessários para a elaboração da curva de compacidade teórica. Considerou-se duas combinações granulométricas, a partir de 3 faixas granulométricas: passante na peneira de 9.6 mm e retida na peneira de 4.75 mm (que será chamada aqui, para facilitar o entendimento, de faixa 1, ou dominante); passante na peneira de 4.75 mm e retida na peneira de 2.38 mm (faixa 2, ou secundária); e passante na peneira de 2.38 mm e retida na peneira de 1.19 mm (faixa 3, ou secundária).

Considerou-se, para comparação, duas combinações granulométricas binárias, com dois modos de empacotamento distintos: combinação 1, composta da faixa 1 e da faixa 2; e combinação 2, composta da faixa 1 e da faixa 3. A Figura 3.2 apresenta esquematicamente as relações granulométricas e seus respectivos empacotamentos ideais aproximados. Para aproximação dos empacotamentos teóricos, foram considerados grãos com elevado grau de esfericidade (como pode ser confirmado a partir da análise dos resultados de PDI) e diâmetros médios compatíveis com as aproximações feitas no esquema.

Figura 3.2 - Relações granulométricas adotadas. (a): Empacotamento de quatro grãos dominantes para cada grão secundário, centralizado. 5.2(b): Empacotamento de três grãos dominantes para cada grão secundário, centralizado.



Fonte: Adaptado de Reed (1995).

A partir dos valores de percentual de vazios de cada uma das faixas granulométricas consideradas (conforme anexo A), realizou-se o cálculo da compactidade experimental de cada faixa, conforme estabelecido pela equação 1. Calculou-se também o efeito de afastamento (equação 4) e efeito-parede (equação 5) ocasionados pela interação dos grãos da classe dominante e grãos de classes secundárias, nas duas combinações granulométricas.

A seguir, definiu-se o método de adensamento a ser utilizado no estudo. Como o concreto permeável é um material que necessariamente deve ser adensado para que possa atingir desempenhos mecânico e hidráulico desejáveis, a escolha de um parâmetro de adensamento incompatível com a realidade teria impacto sobre os valores experimentais e teóricos das compactidades de cada combinação simulada, ou seja, ao escolher um método de adensamento que não seria aquele utilizado na realidade, haveria qualquer distanciamento entre as compactidades máximas obtidas através da planilha, e aquelas obtidas na prática.

No entanto, como nenhum dos parâmetros de empacotamento a seco correspondia ao real método de adensamento adotado no estudo (compactação através de rolo metálico passado em camada única, conforme será detalhado posteriormente), decidiu-se adotar o menor valor de K possível, afim de subestimar a compactidade máxima das combinações granulométricas. Após

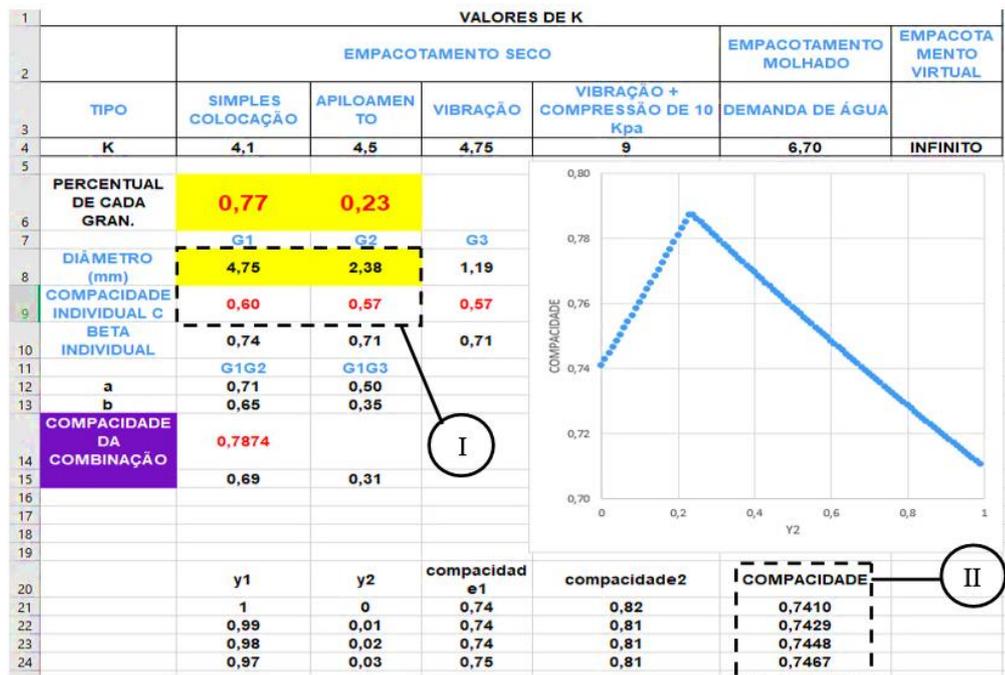
---

<sup>6</sup> A sigla “ac” na figura representa a classe de grãos dominantes, e a sigla “af” representa a classe de grãos secundários.

consideração das implicações do tipo de adensamento a realizar, decidiu-se simular a compacidade de combinações granulares sem adensamento, ou seja, com K igual a 4.1 (simples colocação).

Os valores foram utilizados para alimentar uma planilha excel – conforme pode ser observado na Figura 3.3, que relaciona a compacidade de cada faixa granulométrica (I) e estima a compacidade de uma mistura binária – faixa 1 e faixa 2, no exemplo da figura.

Figura 3.3 – Planilha excel para determinação de compacidade.



Fonte: Planejamento do autor

Dois valores de compacidade foram obtidos – combinação entre faixa 1 e faixa 2, e combinação entre faixa 1 e faixa 3, respectivamente, com uso das equações 2 e 3. As compacidades ótimas foram definidas para misturas com 77% de faixa 1 e 23% de faixa 2, e 75% de faixa 1 e 25% de faixa 3, em percentual de massa, respectivamente.

Após definição teórica das misturas granulares ótimas em função da máxima compacidade, realizou-se segunda caracterização dos agregados, quanto à massa unitária (NBR NM 45 (ABNT) 2006), índice de vazios (NBR NM 45 (ABNT) 2006), absorção de água (NBR NM 53 (ABNT) 2009), com a finalidade de estabelecer as propriedades físicas dos agregados graúdos agora nas misturas granulométricas.

### 3.2.2 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CONCRETOS PERMEÁVEIS COM SEIXO DE CAVA.

A formulação dos traços de concreto permeável seguiu a metodologia proposta por Castro et al. (2009) que adota como parâmetros de controle o teor de pasta e a relação água/cimento. Calculou-se o consumo de cimento para cada mistura com uso da Equação 7. As misturas desenvolvidas, bem como os consumos de materiais, estão agrupados na Tabela 3. Para facilitar as discussões posteriores, M1 representa as misturas que foram desenvolvidas a partir da combinação entre as faixas 1 (4.75 mm) e 2 (2.38 mm), enquanto M2 representa as misturas que foram desenvolvidas a partir da combinação das faixas 1 e 3 (1.19 mm).

Tabela 3 – Consumos de materiais por m<sup>3</sup> e percentuais e pasta e água nas misturas

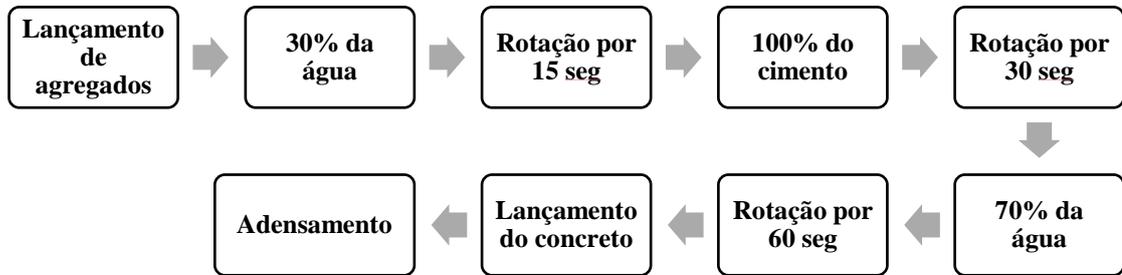
Mistura	Agregados			Teor de pasta	Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo de água (L/m <sup>3</sup> )
	4.75 mm (kg/m <sup>3</sup> )	2.38 mm (kg/m <sup>3</sup> )	1.19 mm (kg/m <sup>3</sup> )				
M1.1	1208,67	361,03	-	0,27	0,30	430,0	130,32
M1.2	1208,67	361,03	-	0,29	0,30	461,9	139,97
M1.3	1208,67	361,03	-	0,31	0,30	493,7	149,62
M1.4	1208,67	361,03	-	0,27	0,32	416,8	134,71
M1.5	1208,67	361,03	-	0,29	0,32	447,6	144,69
M1.6	1208,67	361,03	-	0,31	0,32	478,5	154,67
M1.7	1208,67	361,03	-	0,27	0,34	404,3	138,85
M1.8	1208,67	361,03	-	0,29	0,34	434,2	149,13
M1.9	1208,67	361,03	-	0,31	0,34	464,2	159,42
M2.1	1266,45	-	422,15	0,27	0,30	430,0	130,32
M2.2	1266,45	-	422,15	0,29	0,30	461,9	139,97
M2.3	1266,45	-	422,15	0,31	0,30	493,7	149,62
M2.4	1266,45	-	422,15	0,27	0,32	416,8	134,71
M2.5	1266,45	-	422,15	0,29	0,32	447,6	144,69
M2.6	1266,45	-	422,15	0,31	0,32	478,5	154,67
M2.7	1266,45	-	422,15	0,27	0,34	404,3	138,85
M2.8	1266,45	-	422,15	0,29	0,34	434,2	149,13
M2.9	1266,45	-	422,15	0,31	0,34	464,2	159,42
<b>18 amostras de 40x40x10 cm</b>							

Fonte: o autor (2019).

Os materiais foram lançados em um misturador de eixo inclinado com capacidade para 200 litros, e a ordem e tempos de misturas foram adotados conforme a Figura 3.4, formulada a partir de adaptações do estudo de Neto, Oliveira, e Ramos (2011) para lançamento de materiais em um concreto de elevado desempenho. Na Figura 3.4 apresenta-se a esquematicamente a ordem

de mistura adaptada. Uma vez que o concreto permeável é normalmente um material com abatimento de tronco de cone (Slump) zero, adotou-se como parâmetro de controle das propriedades no estado fresco o teste de aderência do conjunto pasta-agregado, conforme metodologia estabelecida em Tennis et al. (2004).

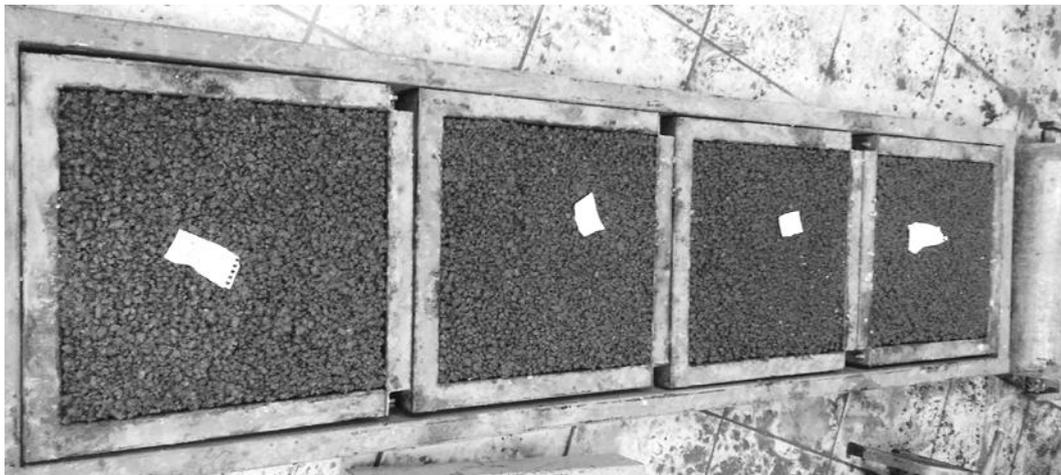
Figura 3.4 – Ordem de mistura.



Fonte: O autor.

Para o adensamento das placas foi utilizado um rolo metálico de 55 kg. De modo que se pudesse corrigir a energia de adensamento para algo similar àquela utilizada por Castro et al. (2009) com cargas de adensamento próximas a 0,08 MPa, o rolo metálico foi aplicado em uma única camada de concreto de 100 mm de altura, com 14 movimentos de ida e volta sobre os moldes, conforme se pode observar na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Jogo de moldes e trilho.



Fonte: o autor

As amostras foram desmoldadas após 48 horas e submetidas à cura submersa em reservatório de água, por 28 dias. De modo a evitar a ocorrência de colmatação nos poros durante a etapa de cura, as placas foram posicionadas verticalmente (com a menor face para cima).

Após a realização de todos os procedimentos experimentais, cada uma das 18 placas de 400x400x100 mm foi dividida em 4 amostras prismáticas de 100x100x400 mm, para que fossem realizados os testes de resistência à tração na flexão (Figura 3.6). Como não há ainda procedimentos padronizados específicos para realização de testes mecânicos em amostras de concreto permeável, os procedimentos foram realizados conforme apresentado pela NBR 12142 (ABNT, 2012).

Figura 3.6 – Teste de resistência à tração na flexão.



Fonte: o autor (2019).

Para avaliação das propriedades do concreto permeável no estado fresco foram realizados os ensaios de massa específica e teor de ar incorporado conforme NBR 9833 (ABNT, 2008), além do teste de coesão pasta-agregados proposto por Tennis et al. (2004), que é um procedimento essencialmente qualitativo e visual. No estado endurecido, foram realizados os ensaios de massa específica do concreto seco, conforme NBR 9833 (ABNT, 2008); coeficiente de permeabilidade, conforme especificado na NBR 16416 (ABNT, 2015); e resistência à tração na flexão, conforme recomendações da NBR 12142 (ABNT, 2010). Realizou-se também procedimentos de caracterização dos poros superficiais e internos característicos das amostras, bem como testes de simulação de desempenho de coberturas drenantes de concreto permeável submetidas à ação de chuvas intensas.

O Quadro 1 reúne todos os procedimentos realizados, bem como as referências adotadas para cada experimento feito, o número de repetições e que tipo de parâmetro relevante da tecnologia cada ensaio pode ser associado.

Quadro 1 – Parâmetros da 2ª etapa.

Variáveis de resposta	Diretrizes	Repetições	Parâmetro
Teste de coesão	Tennis et al. (2004)	-	Relação pasta-agregados
Permeabilidade	NBR 16416 (ABNT, 2005)	2	hidráulico
Taxa de absorção e retenção de água	Adaptado de James e von Langsdorff (2003)	3	hidráulico
Percentual de poros totais, fechados e efetivos	Kim e Lee (2010)	-	hidráulico
Percentual ar incorporado no estado fresco	NBR 9833 (ABNT, 2008)	-	Hidráulico/mecânico
Resistência à tração na flexão	NBR 12142 (ABNT, 2010)	3	Mecânico
Massa específica no estado fresco e endurecido	NBR 9833(ABNT, 2008)	-	Mecânico

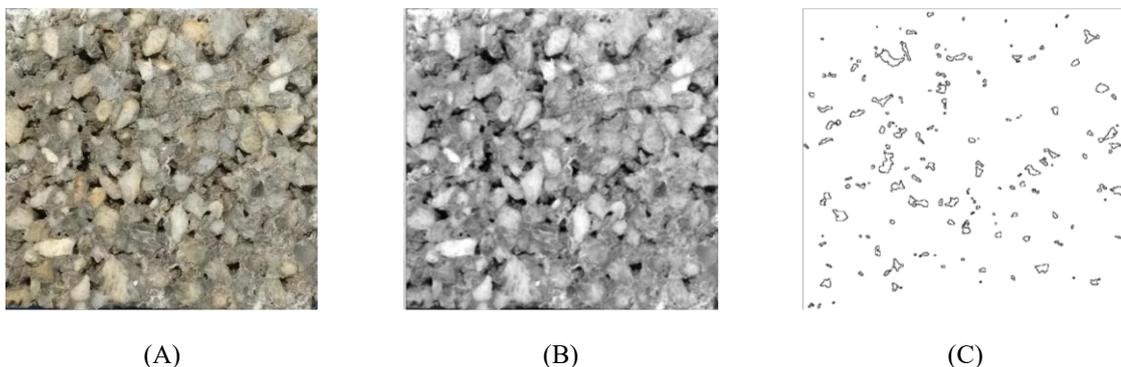
Fonte: Planejamento do autor.

### 3.2.3 POROSIDADE EFETIVA, TOTAL E ANÁLISE DE POROS POR PDI

Ensaio complementares para definição do percentual de poros isolados, efetivos e totais a partir de equações apresentadas por Kim e Lee (2010) foram realizados para auxiliar na verificação da relação de porosidade total e porosidade conectada na matriz de concreto. Realizou-se, finalmente, o processamento digital de imagens (PDI) com auxílio do programa ImageJ para avaliação de poros internos, obtidos em cortes transversais de 2 amostras cúbicas aleatórias, com 100x100x100 mm.

O método de PDI apresenta como vantagem a possibilidade de caracterização interna da matriz de concreto com uso de recursos simples, que envolvem, cronologicamente: registro fotográfico de corte transversal da amostra; conversão de image type para 8 bit; ajuste e padronização de brilho e contraste; ajuste e padronização de percentual de threshold; caracterização em número e dimensões dos outliers identificados na imagem. O procedimento é exemplificado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Exemplo de tratamento de imagens: (A) Registro fotográfico; (B) Configuração para 8 - bit; (C) Caracterização de poros.



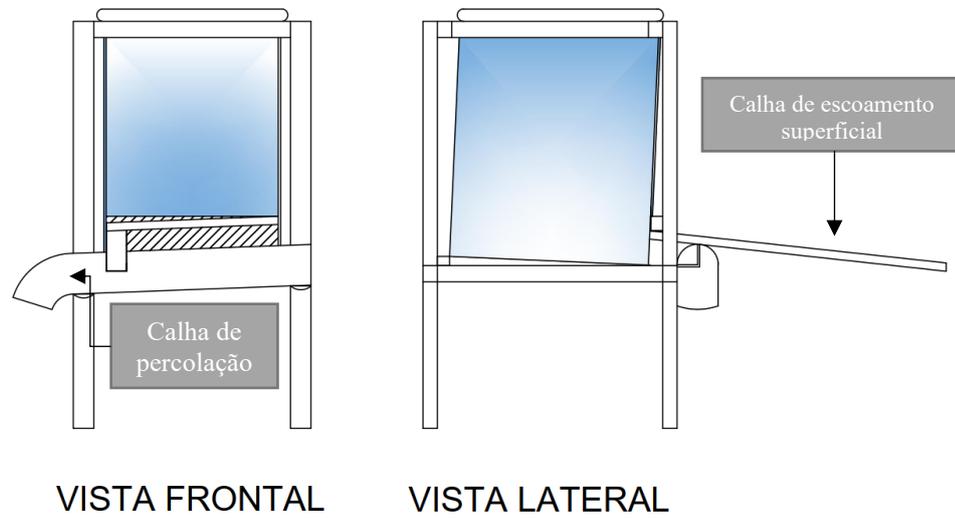
A porosidade efetiva de um concreto permeável é representada pelo percentual de grãos conectados na matriz pasta-agregado, fator de grande influência no grau de permeabilidade de coberturas drenantes.

Para medição da porosidade, de cada placa foram retiradas 2 amostras cúbicas de 100x100x100 mm. As amostras cúbicas foram secas em estufa a 60°C por 24 horas, depois submersas por 24 horas. A seguir, realizou-se pesagem na condição submersa, e por último em condição saturada superfície seca. Nas mesmas amostras, foram feitos registros fotográficos de faces laterais e superiores, afim de caracterizar a estrutura de poros interna e superficial.

### 3.2.4 SIMULAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS

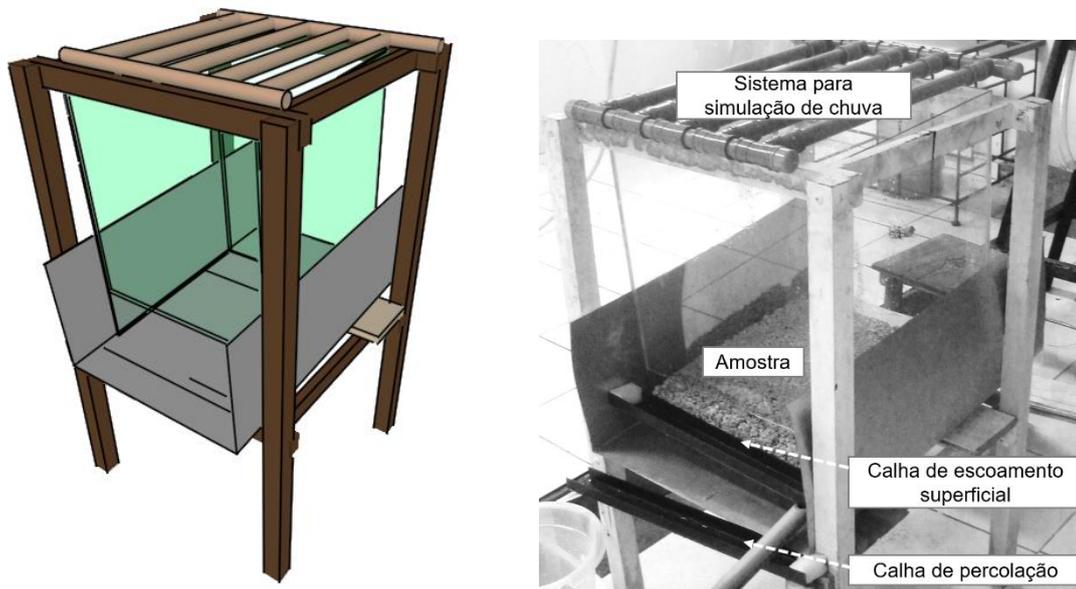
Para avaliação da ação de chuvas intensas sobre a ocorrência de escoamento superficial e o potencial de absorção e retenção de água em amostras de concreto permeável, desenvolveu-se um dispositivo para simulação de chuvas, adaptado de estudos de James e von Langsdorff (2003) e Lamb (2014), conforme Figuras 3.8 e 3.9. O dispositivo em questão foi conectado a um reservatório de água, e foram utilizadas duas calhas, uma para captação de água escoada superficialmente (calha de escoamento superficial), e outra para captação de água absorvida pelas placas, que eventualmente percolaria para a base das amostras (calha de percolação).

Figura 3.8 – Vista frontal e lateral do dispositivo de chuva.



Fonte: o autor (2019).

Figura 3.9 – Configuração do dispositivo de chuva.



Fonte: o autor (2019).

O sistema foi alimentado com uso de um conjunto de tubulação composto por 5 tubos de PVC de 25 mm, com furos paralelos de 0.6 mm (Figura 3.10), conectados a um reservatório de 500 litros, com base posicionada à mesma altura que os furos. A definição da quantidade de furos no sistema foi realizada através de testes preliminares, nos quais procurou-se

observar a vazão necessária nos furos da tubulação para ocasionar o surgimento de escoamento superficial nas amostras.

Durante os procedimentos preliminares, estudou-se a relação entre a declividade da amostra, a chuva intensa e a ocorrência de escoamento superficial. Verificou-se que a vazão aproximada de 6.3 L/m<sup>2</sup>/min-1 e a declividade de 6% ocasionaram o surgimento de escoamento superficial – para taxas inferiores, não foi observada a ocorrência de escoamento superficial (Tabela 4), em nenhuma das inclinações testadas. Padronizou-se, desse modo, a vazão total em 6.3 L/m<sup>2</sup>/min-1 e a inclinação em 6%.

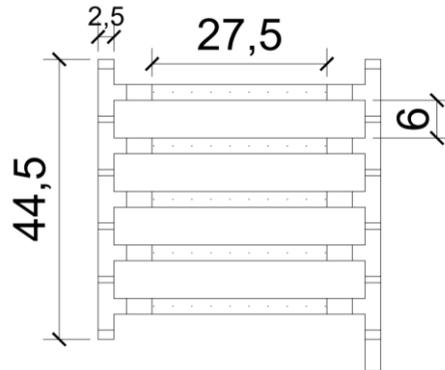
Tabela 4 – Testes prévios para definição de vazão e declividade a serem adotadas no teste de definição do escoamento superficial.

Vazão (L/m <sup>2</sup> . min-1)	Declividade (%)	Escoamento superficial
4,7	< 6	-
5,4	< 6	-
6,3	< 6	-
7,2	< 6	-
7,7	< 6	-
4,7	6	-
5,4	6	-
6,3	6	Surgimento de primeiros vestígios de escoamento superficial

Fonte: O autor.

As amostras foram então submetidas a quatro chuvas idênticas de 15 minutos cada, com intervalos de aproximadamente 3 a 4 minutos entre cada chuva, período no qual as placas pudessem ser retiradas do dispositivo, pesadas e colocadas de volta. Para isso, foram estabelecidas experimentalmente as condições de contorno: todas as placas foram submetidas às mesmas condições de umidade; padronizou-se a altura inicial da coluna d'água no reservatório a cada início de chuva, de modo que a pressão para cada ensaio pudesse variar em proporções iguais para todas as amostras; estabeleceu-se inclinação fixa para todas as amostras; as amostras foram isoladas em um microsistema livre de correntes de ar que pudessem alterar a trajetória natural da chuva simulada, com uso de uma câmara de vidro.

Figura 3.10 – Sistema para Simulação de Chuva: distribuição de furos nas conexões que simulam chuvas intensas.

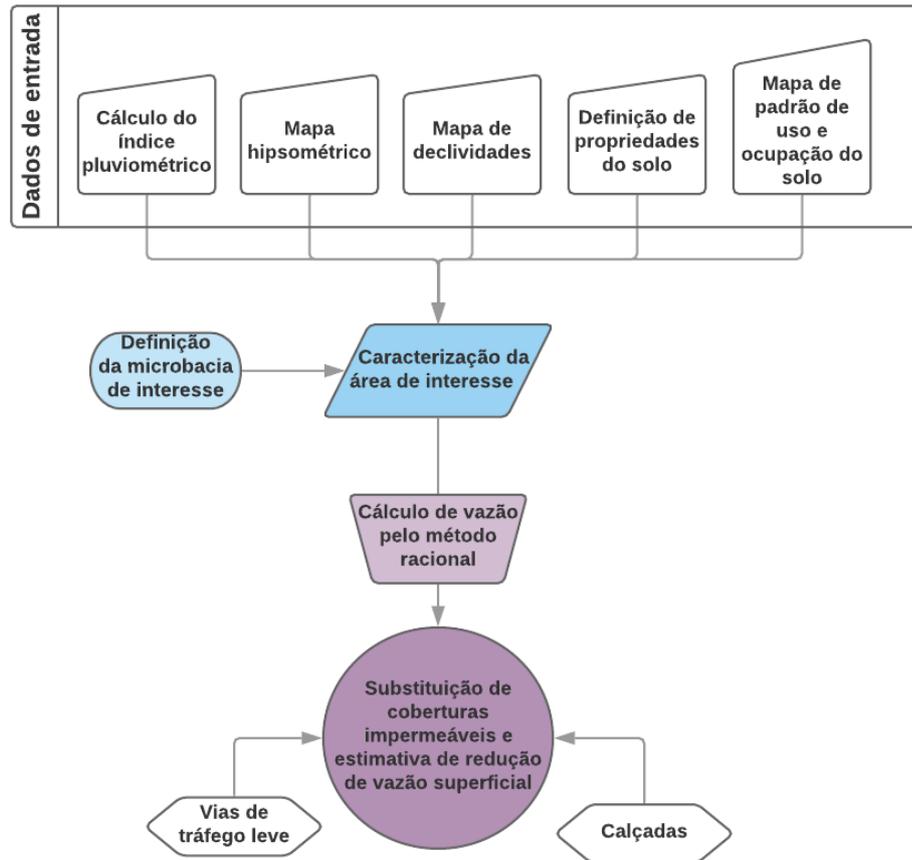


Fonte: o autor (2019).

### 3.2.5 ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO PERMEÁVEL DE SEIXO PARA REDUÇÃO DA VAZÃO SUPERFICIAL

A terceira etapa do projeto compõe estimativa de redução da vazão total, por meio da substituição de pavimentos impermeáveis de concreto e asfalto por coberturas drenantes de concreto permeável de seixo. O delineamento da etapa está organizado na Figura 3.11.

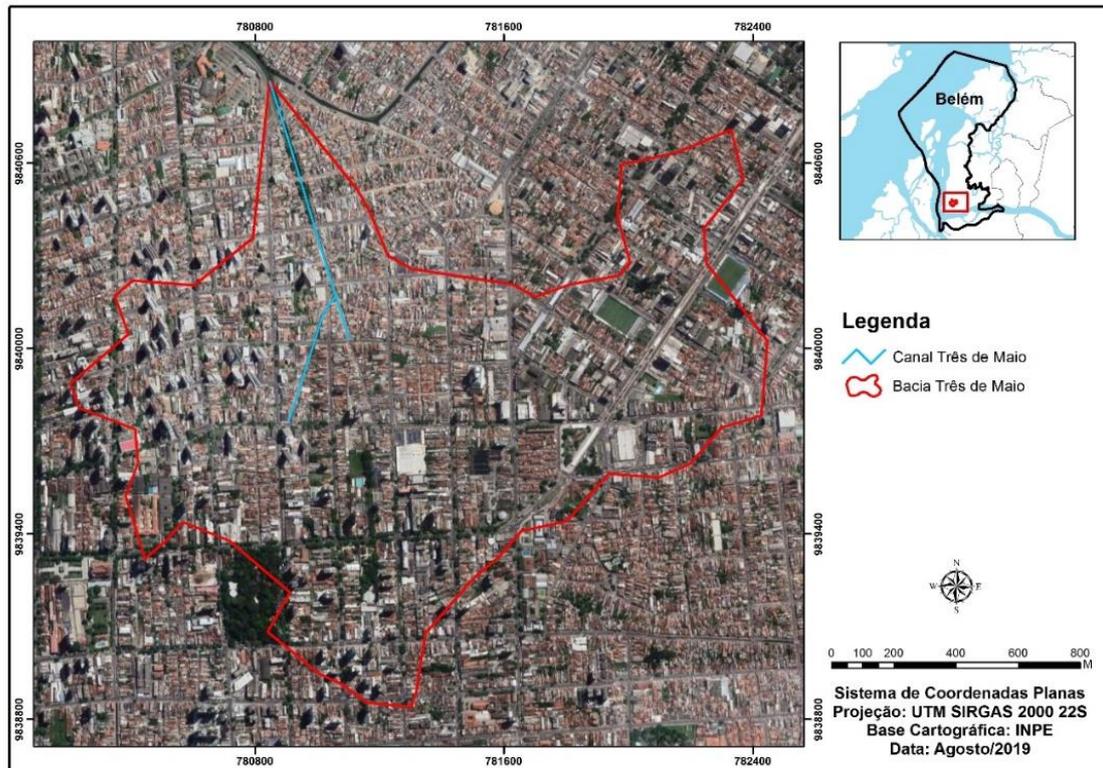
Figura 3.11 – Delineamento da terceira etapa.



Fonte: o autor (2019).

Definiu-se, para análise, a região correspondente à sub-bacia de influência do canal da rua 3 de maio, conforme a Figura 3.12. O canal está inserido na bacia do Una, a maior bacia da cidade de Belém. Utilizou-se como referência para a abordagem os estudos desenvolvidos por Pontes et al. (2012) e Sadeck et al. (2017), nos quais é possível identificar, comparativamente, o aumento na incidência de focos de inundações e alagamentos na cidade. Teve-se como motivação também algumas características da bacia do Una, já abordadas nesse texto, como a elevada taxa de urbanização e densidade demográfica, inclusive em trechos mais próximos à jusante do canal, considerados mais vulneráveis à ocorrência de problemas associados à presença de água superficial.

Figura 3.12 – Região de análise.



Fonte: o autor (2019).

Após definição da área de análise, realizou-se caracterização da mesma a partir dos dados de entrada estabelecidos no delineamento da Figura 3.10. Utilizou-se a equação de chuva proposta por Souza et al. (2012), detalhada na Equação 8.

$$I = \frac{K * TR^a}{(t + b)^c} \quad (8)$$

Onde I é a intensidade de precipitação, em mm.h<sup>-1</sup>; TR é o período de retorno, em anos; t é o tempo de duração da chuva, em minutos; K, a, b e c são constantes da equação de chuvas intensas, ajustadas em função da localidade para a qual a equação está sendo adotada. Considerou-se, para essa análise, chuvas intensas com duração de 15 minutos e período de retorno de 25 anos. K, a, b e c foram definidas, conforme referência, como 960.58, 0.0954 e 9.7993 e 0.7245, respectivamente. A intensidade calculada foi de 127.53 mm/h.

Segundo a última versão do Anuário Estatístico do Município de Belém (2012), “os solos do município tem as mesmas características dos solos da região Bragantina: latossolo amarelodistrófico com textura média; concrecionários lateríticos indiscriminados com textura

indiscriminada; gleieutrófico e distrófico, solos aluviais eutróficos, texturas indiscriminadas”. Tais solos geralmente apresentam moderada a baixa permeabilidade e potencial de saturação (SILVA, 1982). Considerou-se, com base nessas informações, e com a finalidade de simplificar a análise, que o solo do município tem baixo potencial de absorção de águas superficiais, e que a cobertura drenante deve ser dimensionada para funcionar como reservatório – o tipo c, na Figura 2.5.

A área de análise foi finalmente caracterizada quanto à declividade, hipsometria e padrão de uso e ocupação do solo, com auxílio dos programas Google Earth e QGis. Foram consideradas, ainda, diversas variáveis morfológicas da microbacia, que pudessem contribuir para a adequada interpretação das principais causas de fenômenos de alagamento naquela região, como o fator de forma (Kf), o coeficiente de compacidade (Kc), o índice de conformação (Ic), a densidade de drenagem (Dd) e o coeficiente de torrencialidade (Ct). O Quadro 2 reúne algumas propriedades das variáveis analisadas, bem como as equações pertinentes, adaptado de Porto, Zahed Filho e Silva (1999), Paz (2004) e Campanharo (2010).

Quadro 2 – Variáveis de caracterização da microbacia.

Variável	Definição	Equação
<b>Fator de forma (Kf)</b>	Fornece um parâmetro de tendência da bacia a cheias	$Kf=A/Lc^2$ (9), onde A é a área da bacia, e Lc é o curso de água principal
<b>Coefficiente de compacidade (Kc)</b>	Estabelece relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de mesma área que a bacia; o Kc é sempre um valor >1. Quanto menor o Kc, mais circular é a bacia, menor é o tempo de concentração (Tc), e maior a tendência de haver picos de enchentes.	$Kc=P/\sqrt{A}$ (10), onde P é o perímetro e A é a área da bacia
<b>Índice de conformação (Ic)</b>	Expressa a capacidade da bacia em gerar enchentes. Quanto mais próximo de 1, maior a propensão a enchentes, pois a bacia fica cada vez mais próxima de um quadrado e com maior concentração de fluxo	$Ic=A/L^2$ (11), onde A é área e L é o comprimento axial da bacia
<b>Densidade de drenagem (Dd)</b>	Expressa a relação entre o comprimento total dos cursos d'água de uma bacia e sua área total, a partir dos intervalos: Drenagem pobre ( $Dd < 0,5 \text{ km/km}^2$ ); drenagem regular ( $0,5 < Dd < 1,5 \text{ km/km}^2$ ); drenagem boa ( $1,5 < Dd < 2,5 \text{ km/km}^2$ ); drenagem muito boa ( $2,5 < Dd < 3,5 \text{ km/km}^2$ ); excepcionalmente bem drenada ( $Dd > 3,5 \text{ km/km}^2$ ) (Carvalho e Silva, 2006)	$Dd = \sum Ic / A$ (12), onde Ic é cada comprimento dos cursos d'água, e A é a área da bacia
<b>Coefficiente de torrencialidade (Ct)</b>	Relaciona a densidade hidrográfica e a densidade de drenagem, e analisa a tendência de inundação.	$Ct = Dh * Dd$ (13), onde Dh é a densidade hidrográfica e Dd é densidade de drenagem

Fonte: o autor (2019).

Após a caracterização da microbacia, realizou-se estimativas de potencial de aplicação de pavimentos de concreto permeável para reduzir a vazão superficial e, como consequência, evitar enchentes e alagamentos. Para isso, desenvolveu-se uma planilha Excel que correlacionasse a vazão superficial total da região, em função das áreas de cobertura características (de concreto, asfalto, vegetadas), com os coeficientes de escoamento superficial de cada área.

Utilizou-se, para cálculo de vazão, a equação do método racional (Equação 14). Para cálculo do coeficiente de escoamento superficial, foram utilizadas as informações obtidas junto ao mapa de uso e ocupação do solo, das quais calculou-se o escoamento superficial final a partir das médias ponderadas dos coeficientes em diferentes superfícies. A seguir, a equação de vazão:

$$Q = \frac{C * I * A}{360} \quad (14)$$

Onde:

Q é a vazão em m<sup>3</sup>/s;

C é o coeficiente de escoamento superficial, obtido a partir das médias ponderadas de coeficientes adotados para cada cobertura analisada;

I é a intensidade pluviométrica, em mm;

A é a área de análise, em m<sup>2</sup>.

Simulou-se diferentes percentuais de substituição de camadas impermeáveis por camadas de concreto permeável, afim de avaliar comparativamente a redução de vazão total a partir da inserção de materiais com coeficientes de escoamento superficial inferiores àqueles das coberturas em funcionamento. Considerou-se substituições de 10, 20, 30, 40 e 50%, primeiramente em vias para tráfego de pedestres, depois o mesmo percentual de substituição em vias para tráfego de veículos, afim de avaliar a potencial redução da vazão superficial a partir da introdução da tecnologia de concretos permeáveis.

Padronizou-se, para simplificação, vias de asfalto com largura média de 12 metros, contornadas por vias para pedestres dos dois lados – em conformidade com a Lei Complementar de Controle Urbanístico de 1999, Lei N°2/99. Considerou-se cada via para pedestre como uma cobertura de concreto convencional, com 1.2 metros de largura, seguindo especificação obtida em documento desenvolvido pela Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento Sustentável do Rio de Janeiro (2012). Além, disso, as estimativas foram limitadas a vias de circulação de veículos leves e pedestres, sem considerar, por exemplo, possíveis estacionamentos e garagens descobertas presentes na região.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos, com auxílio de elementos gráficos, imagens e procedimentos estatísticos, os resultados referentes às variáveis de resposta deste estudo. Os resultados serão apresentados individualmente, com observações e considerações a respeito de particularidades. Depois, serão apresentados os procedimentos estatísticos pertinentes para a comparação dos resultados individuais obtidos.

### 4.1 TESTE DE COESÃO

Durante a moldagem dos corpos-de-prova de concreto, foram realizados testes de coesão, ou seja, a força de interação entre o conjunto pasta-agregado. Não foram observadas diferenças visuais entre amostras dentro do mesmo grupo granulométrico, com exceção de amostras extremas – como entre M1.1 e M1.9, e M2.1 e M2.9. Assim, os resultados considerados pertinentes sobre a coesão das misturas estão agrupados no Quadro 3.

Quadro 3 – Teste de coesão.

Amostra	Representação	Comentários
<p><b>M1.1 - Mistura com o menor teor de pasta (0.27) e a menor relação a/c (0.30) do primeiro grupo granulométrico (4.75 mm e 2.38 mm)</b></p>		<p>Apresentou coesão, ou seja, aderência entre pasta de cimento e grãos de seixo. Visualmente, não foi constatada anomalia que pudesse ser justificada pela proporção inadequada dos materiais. Todas as misturas seguintes, de M1.2 a M1.9, apresentaram coesão semelhante.</p>

<p><b>M1.9 - Mistura com o maior teor de pasta de cimento (0.31) e a maior relação a/c (0.34) dentre as misturas do primeiro grupo granulométrico</b></p>		<p>Apresentou comportamento razoavelmente similar ao de M1.1, com coesão entre os grãos. Observou-se, no entanto, que o maior consumo de água, associado à baixa rugosidade superficial dos grãos de seixo, teve como consequência a baixa aderência da pasta à superfície dos grãos, conforme pode ser observado a partir das setas.</p>
<p><b>M2.1 - Mistura com o menor teor de pasta (0.27) e a menor relação a/c (0.30) do segundo grupo granulométrico (4.75 mm e 1.19 mm)</b></p>		<p>O teor de pasta foi insuficiente para garantir o adequado cobrimento dos grãos (conforme pode ser observado com auxílio das setas). Além disso, observa-se que a quantidade de água inserida na mistura fora insuficiente para garantir a adequada fluidificação da pasta de cimento e umidificação dos grãos. Tal constatação pode ser facilmente identificada pela verificação da aparência opaca da amostra na imagem.</p>
<p><b>M2.9 - Mistura com o maior teor de pasta de cimento (0.31) e a maior relação a/c (0.34) dentre as misturas do segundo grupo granulométrico</b></p>		<p>A fluidificação da pasta de cimento enfraqueceu a aderência da pasta à superfície dos grãos. No entanto, foram observados nichos de pasta/agregados nas misturas com grãos menores, que viriam a ser identificadas ao longo da realização de experimentos como pontos fracos nas matrizes de concreto, que reduzem a permeabilidade, sem contribuir para ganhos de resistência.</p>

Fonte: o autor (2019).

Constatou-se que a aderência da pasta de cimento aos grãos, e mesmo a coesão dos componentes da mistura de concreto, foram afetados pela variação do consumo de água e cimento das misturas. Além disso, apesar da elevada esfericidade, atestada através de testes com

PDI (ANEXO A), e do potencial de obter concretos permeáveis mais resistentes em misturas onde há maior potencial de empacotamento entre os grãos (TENNIS et al. (2004)), observou-se de imediato a fragilidade superficial do seixo de cava, quando variações simultâneas no teor de pasta e na relação a/c geraram misturas mais coesas, mas não evitaram a identificação de grãos sem adequado cobrimento. Os resultados gerais de coesão e cobrimento estão resumidos no Quadro 4.

Quadro 4 – Coesão e cobrimento das misturas.

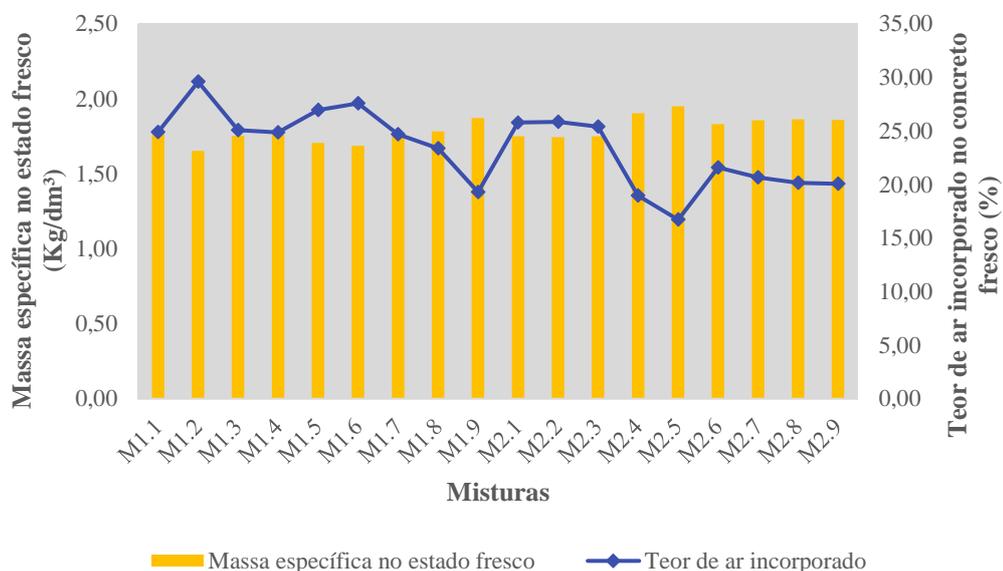
Mistura	Coesão			Cobrimento		
	Excelente	Bom	Razoável	Excelente	Bom	Razoável
M1.1	X			X		
M1.2	X			X		
M1.3	X			X		
M1.4	X				X	
M1.5	X				X	
M1.6	X				X	
M1.7	X					X
M1.8	X					X
M1.9	X					X
M2.1		X			X	
M2.2		X			X	
M2.3		X			X	
M2.4		X			X	
M2.5		X			X	
M2.6		X			X	
M2.7			X		X	
M2.8			X		X	
M2.9			X		X	

Fonte: o autor (2019).

## 4.2 MASSA ESPECÍFICA E TEOR DE AR NO ESTADO FRESCO

Na figura 4.1, estão agrupados os valores médios de massa específica e teor de ar incorporado às amostras no estado fresco. Observou-se que os valores de massa específica obtidos ficaram inseridos no intervalo de concordância apontado por Tennis et al. (2004) como massa específica característica de concretos permeáveis, entre 1600 e 2000 kg/m<sup>3</sup>. O teor de ar incorporado, por sua vez, variou de 15 a 30%.

Figura 4.1 – Massa específica e teor de ar incorporado.



Fonte: o autor (2019).

Não foram verificados padrões comportamentais que correlacionassem o teor de ar incorporado às misturas no estado fresco com a massa específica. As amostras de M1 apresentaram, em média, massa específica 5% inferior às amostras M2. Notou-se, no entanto, através de avaliação t Student, que as diferenças observadas não foram estatisticamente significativas de um grupo granulométrico para o outro. Em relação ao teor de ar incorporado, amostras M1 apresentaram teor até 16% maior que as amostras do segundo grupo, valor estatisticamente significativo.

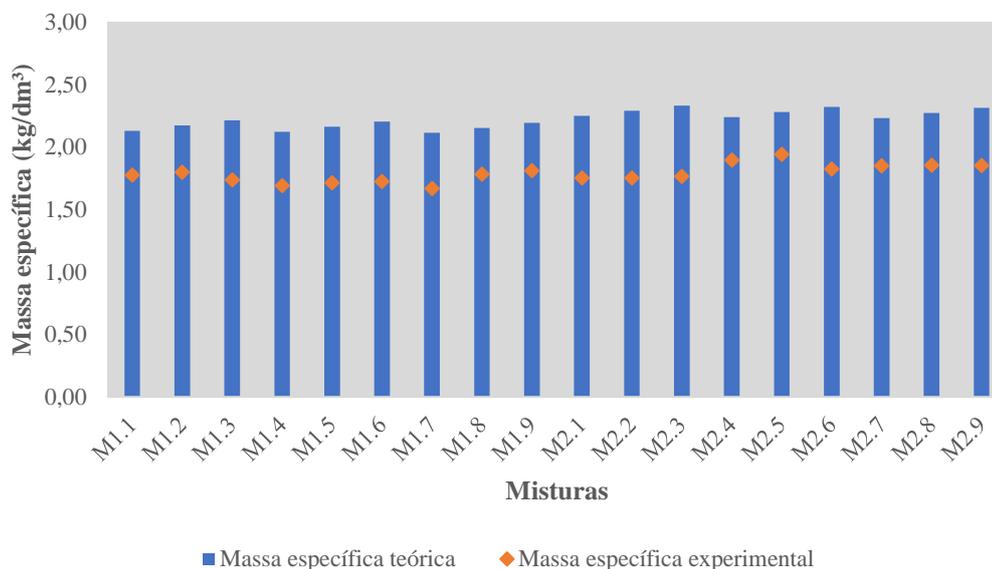
As diferenças observadas nos dois grupos (M1 e M2) em relação ao teor de ar incorporado são compatíveis com a porosidade obtida para cada esqueleto granular, durante os testes preliminares de compacidade: as amostras M2, com maior compacidade – verificar estudo de empacotamento virtual no Anexo A, apresentaram, em média, menor teor de ar incorporado à matriz de concreto.

### 4.3 MASSA ESPECÍFICA NO ESTADO ENDURECIDO

Do estado fresco para o estado endurecido, a massa específica das amostras variou, em média, 0,3%, sem ter apresentado alterações significativas em nenhum dos corpos-de-prova analisados. Na Figura 4.2 foram reunidos os resultados médios de massa específicas

experimentais de cada amostra, e suas respectivas massas específicas teóricas, obtidas a partir de dosagem de materiais pelo método proposto por Castro et al. (2009).

Figura 4.2 – Relação entre massa específica teórica e massa específica experimental.



Fonte: o autor (2019).

Em média, as massas específicas experimentais apresentaram valores até 20% inferiores àqueles que haviam sido estabelecidos durante o processo de dosagem. Sumanasooriya e Neithalath (2011) estabeleceram que variações entre valores teóricos e experimentais, principalmente para variáveis que tenham relação direta com propriedades dos poros internos da matriz de concreto - como é o caso da massa específica, são influenciados fundamentalmente pelo teor de pasta da mistura (quanto mais pasta de cimento é inserida, menor será a discrepância entre valores teóricos e experimentais de porosidade e massa específica, segundo os autores) e pelo método de adensamento adotado (número de camadas para adensar, carga aplicada durante o adensamento, uso ou não de vibração). Suleiman et al. (2006), por sua vez, identificaram a influência da energia de compactação sobre diversas propriedades do concreto permeável, e concluíram que maiores energias de adensamento proporcionam misturas mais densas.

Como no presente estudo o método de adensamento foi padronizado para todas as moldagens (passagem de rolo metálico, em 14 movimentos de vai-e-vem, sobre camada única de 100 mm de concreto permeável), não há como dimensionar o real impacto do modelo de adensamento sobre a massa específica das matrizes permeáveis. No entanto, deve-se considerar que as variações no teor de pasta de uma mistura para a outra não pareceram incrementar as

massas específicas experimentais, e conclui-se que o fator preponderante para as diferenças entre massas específicas teóricas e experimentais tenha sido o método de adensamento.

#### 4.4 PERMEABILIDADE

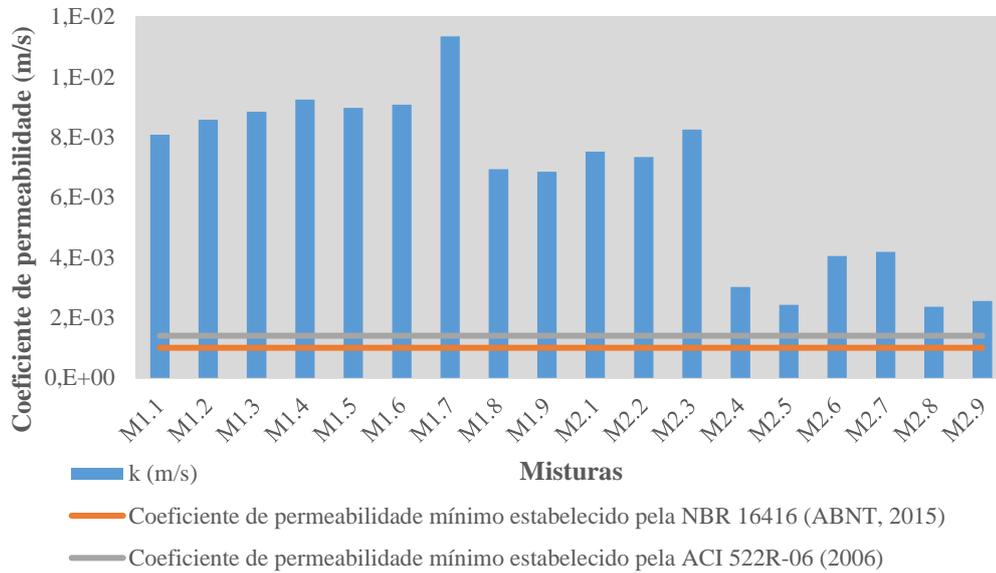
Foram realizados, a seguir, testes de permeabilidade (Figura 4.3). Os resultados obtidos estão agrupados na Figura 4.4. Todas as amostras apresentaram coeficientes de permeabilidade vastamente superiores àqueles recomendados pelas normativas nacionais e internacionais – conforme abordado na revisão, as normativas recomendam coeficientes com valores entre 1 e 1.4 mm/s.

Figura 4.3 – Teste de permeabilidade em placa de concreto permeável.



Fonte: o autor (2018).

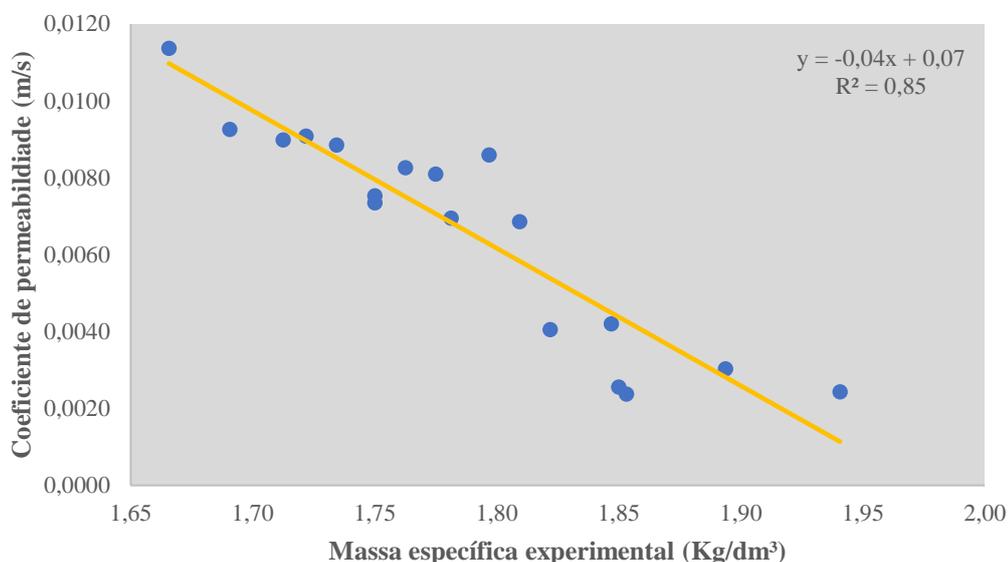
Figura 4.4 – Coeficiente de permeabilidade das amostras.



Fonte: o autor (2019).

Em média, as amostras do segundo grupo (M2) apresentaram o equivalente à metade da permeabilidade observada nas amostras do primeiro grupo –  $8.67E-3$  de permeabilidade média em M1, e  $4.64E-3$  de permeabilidade média em M2, respectivamente. Com a finalidade de investigar as possíveis causas para as diferenças de permeabilidade entre os dois grupos, associou-se os coeficientes de permeabilidade obtidos com as massas específicas experimentais das amostras, com a finalidade de avaliar a correlação entre a densificação das matrizes de concreto e a redução da permeabilidade (Figura 4.5). Obteve-se resultados bastante consistentes quanto à correlação entre as variáveis analisadas, com  $R^2$  0.85.

Figura 4.5 – Relação entre coeficiente de permeabilidade  $k$  e massa específica experimental.



Fonte: o autor (2019).

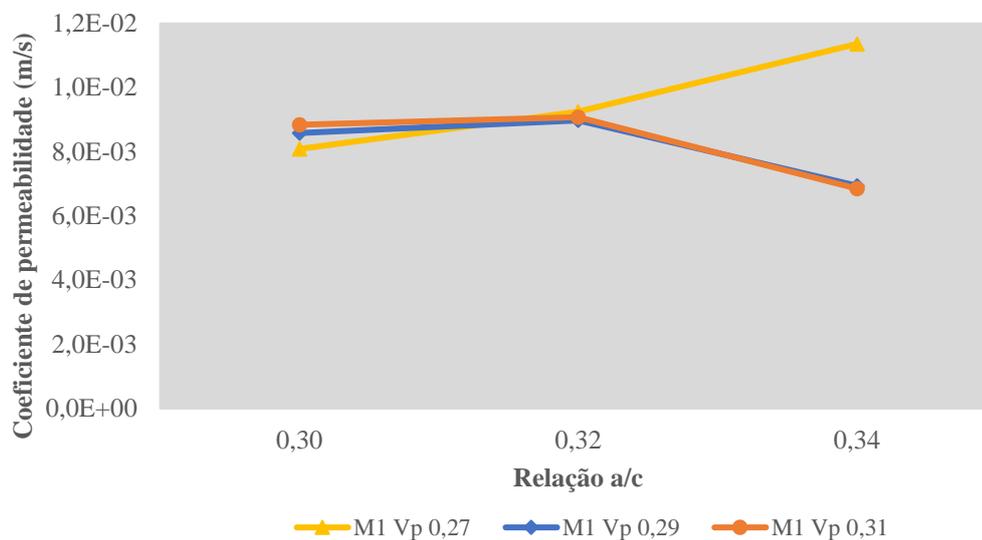
Ibrahim et al. (2014) já haviam abordado a correlação linear entre permeabilidade e massa específica. Os autores, assim como no presente estudo, realizaram estudo de permeabilidade em concretos permeáveis variando o diâmetro característico dos agregados, e concluíram que esse parâmetro pode influenciar nas propriedades de percolação de fluidos em concretos permeáveis, devido às variações na massa específica da matriz de concreto: maiores massas específicas representam menor percentual de poros e, conseqüentemente, menor permeabilidade.

As diferenças de permeabilidade entre os dois grupos granulométricos desse estudo foram, portanto, associadas à variação granulométrica e densificação das matrizes de concreto, que apesar de não terem sido estatisticamente relevantes – conforme observado em 4.2, o foram suficientemente importantes para que houvesse significativa diferença de permeabilidade entre as amostras e os grupos granulométricos.

Correlacionou-se, a seguir, o coeficiente de permeabilidade das amostras com as relações  $a/c$  adotadas, para cada teor de pasta (Figuras 4.6 para o primeiro grupo granulométrico, e 4.7 para o segundo grupo granulométrico). Foram verificados alguns aspectos relevantes: M1 e M2 apresentaram comportamentos distintos com relação ao aumento de  $a/c$ , para cada faixa de pasta de cimento adotada. Nas amostras do grupo M1, verificou-se que a variação da relação  $a/c$  de 0.30 para 0.32 não resultou em alteração significativa de porosidade ou permeabilidade em nenhum dos teores de pasta adotados. Para a relação seguinte ( $a/c$  0.34), por sua vez, observou-

se a redução da permeabilidade em amostras com teor de pasta 0.29 e 0.31 em até 25%, e o aumento da permeabilidade para a mistura com teor de pasta 0.27 em torno de 25%.

Figura 4.6 – Relação entre permeabilidade e relação a/c para cada faixa de teor de pasta no primeiro grupo granulométrico.

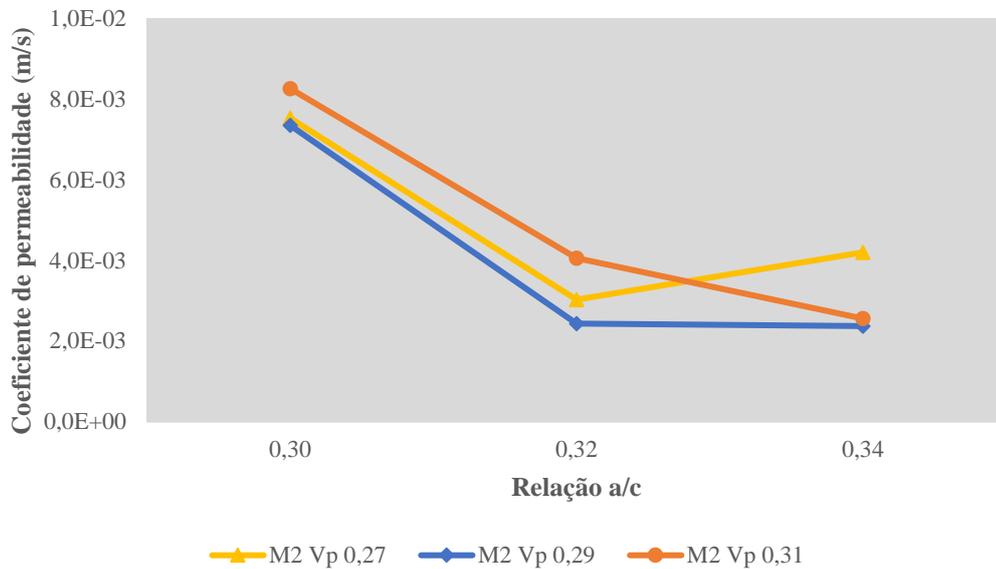


Fonte: o autor (2019).

O comportamento pode ser explicado do seguinte modo: para misturas com maiores teores de pasta (0.29 e 0.31), a primeira variação da relação a/c não fluidificou a pasta de cimento o suficiente para que houvesse drástica alteração na estrutura interna do material. Na sequência, o aumento da relação a/c resultou na colmatação de poros na estrutura interna da matriz de concreto, por ação da pasta de cimento, reduzindo moderadamente a capacidade de percolação da água. Nas misturas com o menor teor de pasta (0.27), por sua vez, o aumento do consumo de água, associado ao menor consumo de cimento, resultou na fluidificação da pasta de cimento e a dificuldade de aderência superficial e conexão dos grãos, o que, por sua vez, resultou em amostras com porosidade crescente.

Nas amostras do grupo M2, o aumento da relação a/c provocou drástica redução na capacidade de percolação da água para todas as amostras – de 50 a 65% de diminuição da permeabilidade, seguida de aparente estabilização. Esse comportamento diferenciado pode ser explicado do seguinte modo: devido ao maior empacotamento dos grãos nesse grupo, a fluidificação da pasta de cimento, ocasionada pelo aumento da relação a/c, teve como resultado elevada colmatação interna da matriz de concreto, reduzindo o percentual de poros e resultando em nichos impermeáveis.

Figura 4.7 – Relação entre permeabilidade e relação a/c para cada faixa de teor de pasta no segundo grupo granulométrico.



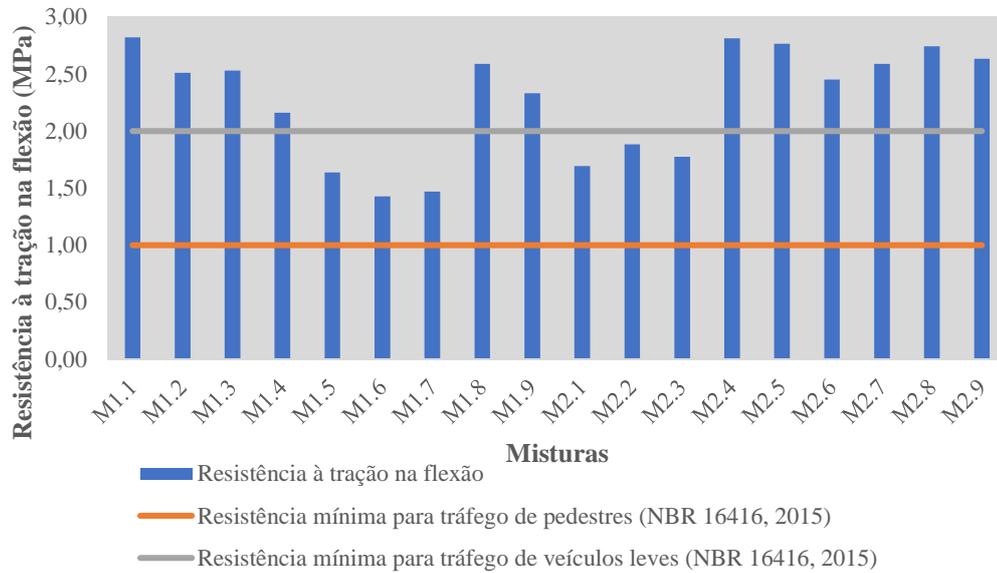
Fonte: o autor (2019).

Finalmente, a relação a/c 0.34 resultou em misturas mais compactas, com maior teor de pasta de cimento entre os grãos de agregados. Isso fora explicado, mais uma vez, pelo processo de colmatação de poros ocasionados pelo maior volume de pasta. A propriedade de colmatação interna ocasionada pela pasta de cimento é apontada por Sumanasooriya, Deo, e Neithalath (2013) para variações de permeabilidade entre amostras com o mesmo percentual de poros.

#### 4.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A seguir, realizou-se procedimentos para avaliação da resistência à tração na flexão. Em média, a resistência à tração na flexão das amostras do segundo grupo granulométrico (M2) foi maior que a resistência obtida nas amostras de M1 – 2.37 MPa e 2.16 MPa, respectivamente, totalizando em torno de 10% de diferença média. Os resultados estão compatíveis com diversos estudos anteriores, que identificaram a relação entre a redução do diâmetro característico dos grãos e a maior compactidade da matriz de concreto, que potencializam maiores resistências no material (ĆOSIC et al. 2015; MEDDAH et al. 2017; YANG e JIANG 2003). Destaca-se que todas as amostras apresentaram resistência mínima para uso em vias de tráfego de pedestres, e 12 das 18 amostras apresentaram resistência à tração na flexão suficiente para uso em vias de tráfego leve. Os valores obtidos estão agrupados na Figura 4.8.

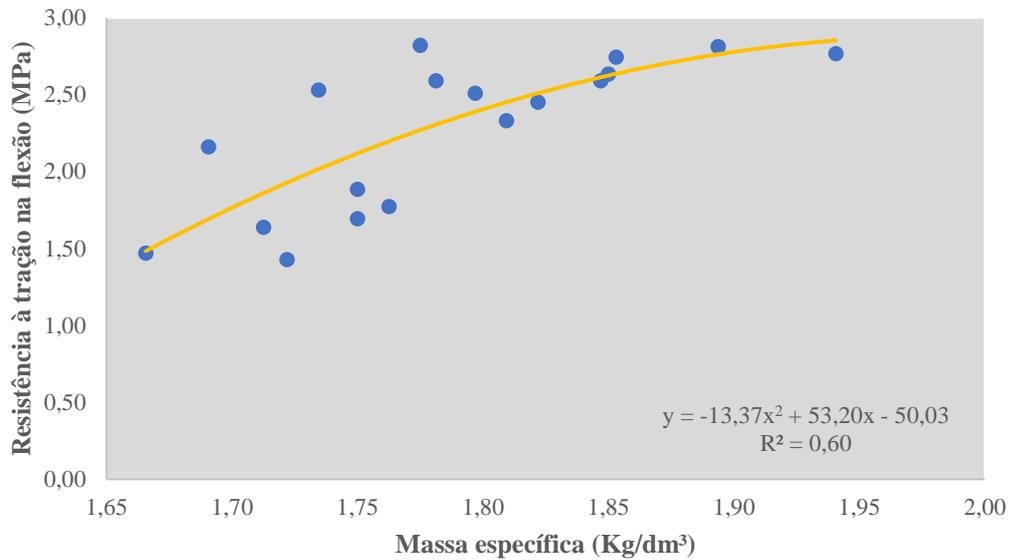
Figura 4.8 – Resistência à tração na flexão nos dois grupos granulométricos.



Fonte: o autor (2019).

Os resultados de resistência à tração na flexão foram comparados às massas específicas das amostras, e os resultados estão reunidos na Figura 4.9. A correlação exponencial entre massa específica e resistência à tração na flexão foi identificada, com  $R^2$  0.60, o que pode ser considerado um valor moderado. Os resultados obtidos são compatíveis com as conclusões do estudo de Brake, Allahdadi e Adam (2016). Além disso, os resultados corroboram para o entendimento de que a massa específica experimental seja um parâmetro de grande relevância para a caracterização de desempenho mecânico e hidráulico de concretos permeáveis.

Figura 4.9 – Relação entre resistência à tração na flexão e massa específica experimental.

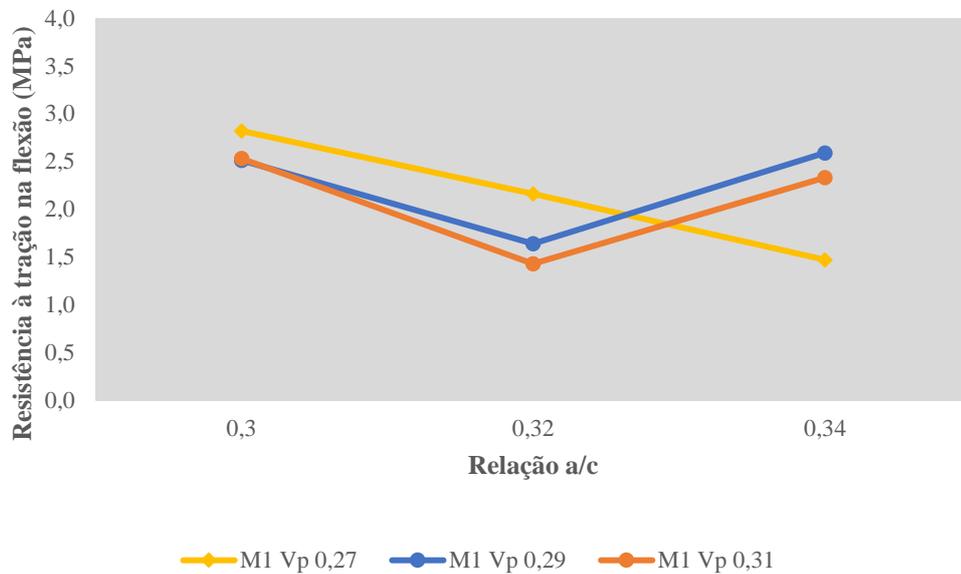


Fonte: o autor (2019).

Foram correlacionadas ainda a resistência à tração na flexão e a relação a/c para cada teor de pasta de cimento adotado. Até certo ponto, as misturas granulares apresentaram, comparativamente, comportamento oposto quando do aumento do consumo de água e redução do consumo de cimento. Na interação M1 (Figura 4.10), em teores de pasta 0.29 e 0.31, as variações de relação a/c para 0.30 reduziram a resistência à tração na flexão média em torno de 1 MPa, enquanto a variação de relação de 0.32 para 0.34 resultou em resistências médias similares ao que foi observado na relação a/c 0.30. Nas misturas com teor de pasta 0.27, maiores relações a/c resultaram em variações negativas na resistência. Conclui-se que a fluidificação da pasta de cimento afetou negativamente o desempenho do material como um todo, gerando misturas menos permeáveis, sem necessariamente as tornar mais resistentes

Quanto às misturas M2 (Figura 4.11), observou-se que o aumento da relação a/c invariavelmente tornou as matrizes menos permeáveis e potencialmente mais resistentes – em até 40%, conforme esperado. Notou-se, no entanto, que a variação de relação a/c de 0.32 para 0.34 não resultou em misturas mais permeáveis, estabelecendo o entendimento que para o caso analisado e nas condições de contorno estabelecidas, a relação 0.32 ofereceu o desempenho máximo.

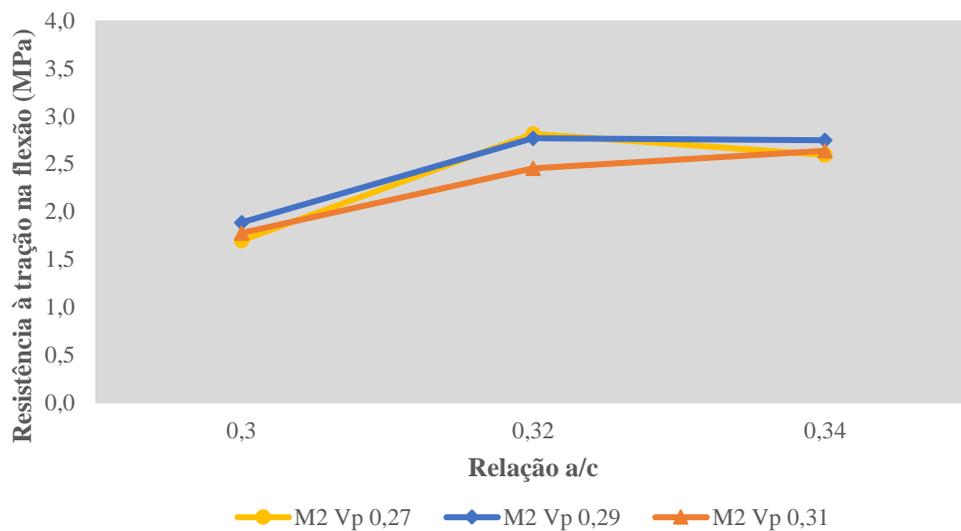
Figura 4.10 – Relação entre resistência à tração na flexão e relação a/c para cada faixa de teor de pasta no primeiro grupo granulométrico.



Fonte: o autor (2019).

Ainda em M2, as menores resistências em relação a/c 0.30 foram associadas à insuficiência de pasta de cimento para realizar o cobrimento de todo o esqueleto granular, devido à maior área superficial desse grupo de amostras.

Figura 4.11 – Relação entre resistência à tração na flexão e relação a/c para cada faixa de teor de pasta no segundo grupo granulométrico.



Fonte: o autor (2019).

## 4.6 ANÁLISE DE POROS

### 4.6.1 POROSIDADE EFETIVA E POROSIDADE TOTAL

Na Tabela 5, estão reunidos os resultados experimentais de caracterização de poros totais, efetivos e isolados. Os valores de porosidade total encontrados estão dentro de intervalos de valores apontados normalmente pela literatura internacional, de 15 a 35% (TENNIS et al., 2004).

Tabela 5 – Relação de poros conectados, fechados e totais.

Mistura	Poros conectados (%)	Poros fechados (%)	Porosidade total (%)
M1.1	23.83	6.93	30.76
M1.2	26.10	7.51	33.61
M1.3	23.80	7.27	31.07
M1.4	22.51	7.57	30.08
M1.5	23.61	8.02	31.64
M1.6	23.27	8.32	31.59
M1.7	31.99	7.30	39.29
M1.8	19.24	8.99	28.23
M1.9	16.57	10.00	26.57
M2.1	21.62	8.70	30.32
M2.2	21.32	8.08	29.41
M2.3	22.05	9.29	31.34
M2.4	16.86	8.32	25.18
M2.5	13.11	8.35	21.47
M2.6	23.84	9.03	32.87
M2.7	20.51	9.17	29.68
M2.8	17.96	10.40	28.35
M2.9	20.84	9.01	29.85

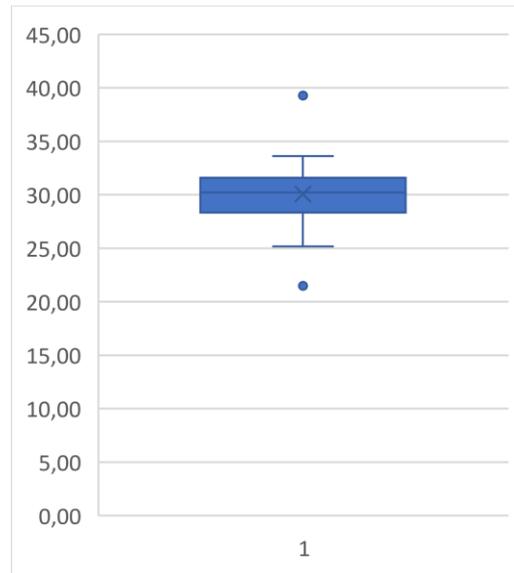
Fonte: o autor (2019).

Visto que os resultados das amostras M1.7 e M2.5 apresentaram resultados relativamente discrepantes do que foi obtido em média, realizou-se o teste estatístico de variância, a partir do diagrama de extremos e quartis (Figura 4.12), e as duas amostras foram identificadas como outliers – ou seja, com resultados fora do padrão de representação do restante. Ressalta-se que esse tipo de análise estatística, bem como testes de normalidade (diagrama de extremos e quartis), foram feitos em todos os grupos de resultados experimentais, mas o autor optou por

abordar na discussão somente casos onde foram identificados parâmetros fora do padrão – como é o caso.

De posse desses resultados, tais valores foram excluídos das próximas análises, para evitar que os dados fossem interpretados erroneamente, e a porosidade total média dos dois grupos granulares, M1 e M2, foi, respectivamente 31.43% e 28.72%.

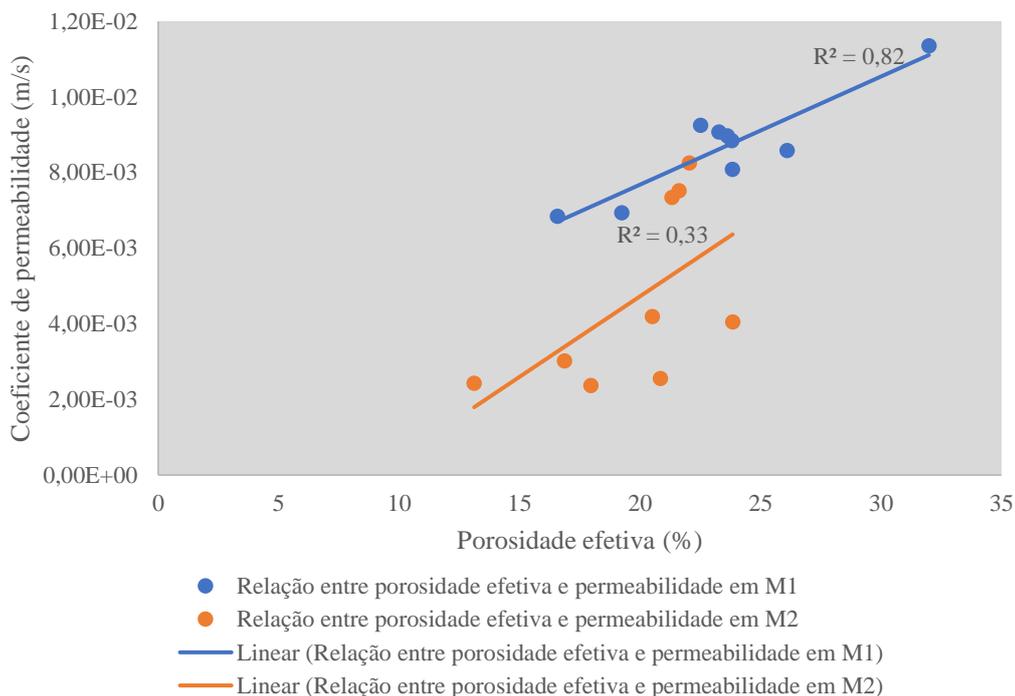
Figura 4.12 – Diagrama de extremos e quartis para porosidade total.



Fonte: o autor (2019).

A porosidade efetiva média de cada grupo, ou seja, a porosidade com a qual estaria associado o potencial de percolação de fluidos de uma superfície à outra das placas, foi, respectivamente, 22.4% e 20.6%, para M1 e M2. Em relação aos poros fechados ou isolados, os valores obtidos para M1 e M2 foram, respectivamente, 7.99% e 8.93%. A seguir, os valores de porosidade efetiva foram comparados com os resultados de permeabilidade, afim de atestar a correlação entre os dois parâmetros (Figura 4.13).

Figura 4.13 – Relação entre o coeficiente de permeabilidade e a porosidade efetiva.



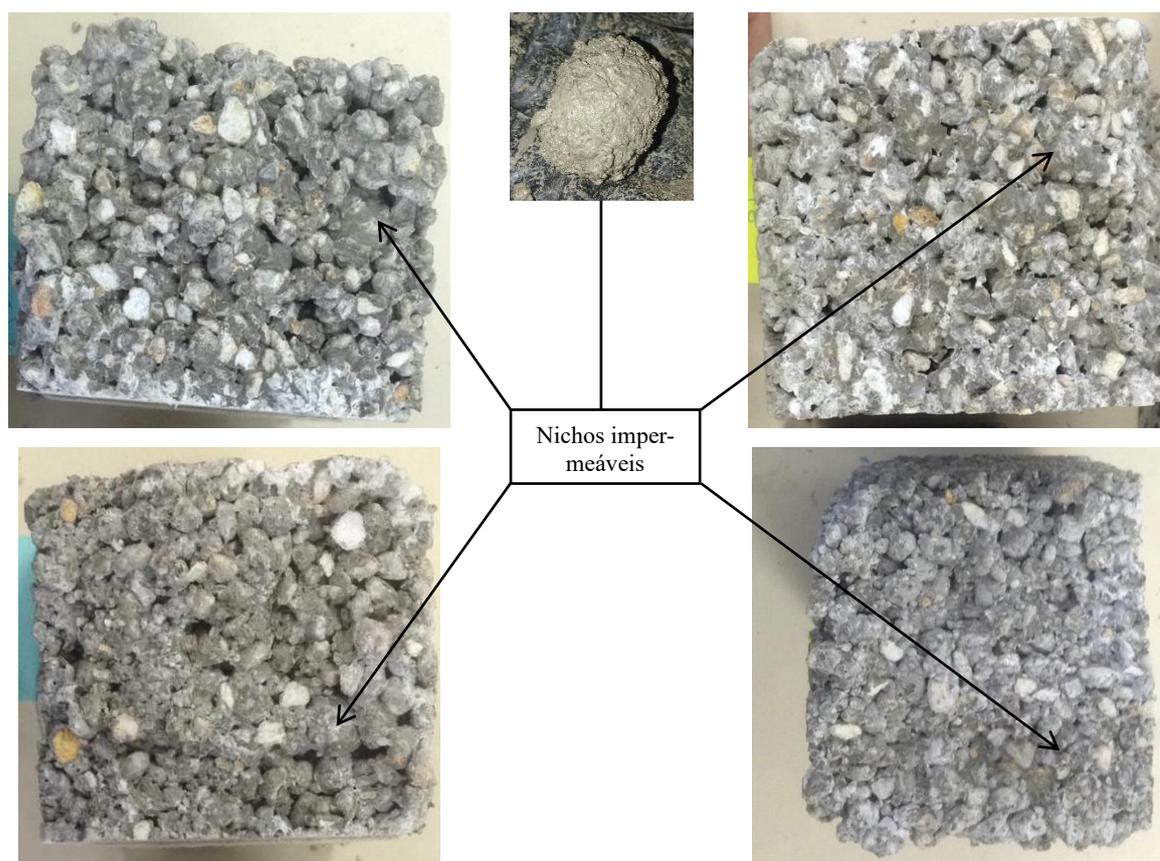
Fonte: o autor (2019).

A partir do gráfico, foi possível observar que houve correlação linear muito maior entre porosidade efetiva e permeabilidade para as amostras do primeiro grupo granulométrico (M1) do que entre as amostras do segundo grupo granulométrico. Observou-se, ainda, que apesar de terem apresentado valores de porosidade total e especialmente porosidade efetiva relativamente similares, as amostras do segundo grupo granulométrico obtiveram redução de até metade do coeficiente de permeabilidade em comparação aos coeficientes obtidos em M1.

Concluiu-se que as diferenças de coeficiente de permeabilidade, principalmente nas misturas M2, poderiam estar associadas então às características internas dos poros, como diâmetro e tortuosidade, por exemplo, o que estaria dificultando a percolação de água através da matriz de concreto. Tal constatação foi verificada posteriormente, através dos testes de PDI.

Foram analisados os registros fotográficos dos cortes transversais das amostras, após o experimento de resistência à tração na flexão, e foram identificados, especialmente em M2, os nichos impermeáveis observados nos testes preliminares de coesão (Figura 4.14). Tais nichos geram pontos de baixa permeabilidade dentro das matrizes de concreto, e fazem com que amostras que apresentam percentual de poros similar- como é o caso apresentado – tenham eventualmente coeficientes de permeabilidade discrepantes (SUMANASOORIYA et al. 2013).

Figura 4.14 – Nichos impermeáveis dentro das amostras de concreto permeável



Fonte: o autor (2019).

#### 4.6.2 ANÁLISE DE POROS INTERNOS POR MÉTODO DE PDI

Após os experimentos para definição de percentual de poros totais, conectados (efetivos) e isolados (fechados), foi feita análise de registros fotográficos dos cortes transversais das amostras, através de PDI. Os registros estão agrupados no ANEXO B deste documento. A caracterização dos poros, por sua vez, está agrupada na Tabela 6. Calculou-se, ainda, a tortuosidade das amostras.

Tabela 6 – Caracterização de poros internos.

<b>Amostra</b>	<b>Conta- gem de poros</b>	<b>Área total de poros (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Tamanho médio de poros (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Área per- centual de poros (%)</b>	<b>Perímetro (mm)</b>	<b>Tortuosidade</b>
<b>M1.1</b>	290	334	1.15	3.44	4.13	1.79
<b>M1.2</b>	237	329	1.39	3.45	3.95	1.73
<b>M1.3</b>	234	312	1.33	3.38	4.33	1.78
<b>M1.4</b>	162	312	1.92	3.20	5.41	1.80
<b>M1.5</b>	271	298	1.10	3.07	3.87	1.77
<b>M1.6</b>	168	248	1.48	2.57	4.30	1.77
<b>M1.7</b>	181	343	1.90	3.53	4.88	1.63
<b>M1.8</b>	242	398	1.65	4.04	4.81	1.85
<b>M1.9</b>	230	330	1.44	3.33	4.41	1.89
<b>M2.1</b>	310	297	0.96	3.11	3.47	1.80
<b>M2.2</b>	343	266	0.78	2.93	3.13	1.82
<b>M2.3</b>	274	377	1.38	3.99	4.01	1.78
<b>M2.4</b>	343	309	0.90	3.57	3.54	1.92
<b>M2.5</b>	341	322	0.94	3.70	3.47	2.03
<b>M2.6</b>	211	366	1.74	3.84	4.70	1.75
<b>M2.7</b>	235	214	0.91	2.26	3.22	1.81
<b>M2.8</b>	198	263	1.33	2.68	3.82	1.84
<b>M2.9</b>	274	355	1.30	3.58	4.23	1.81

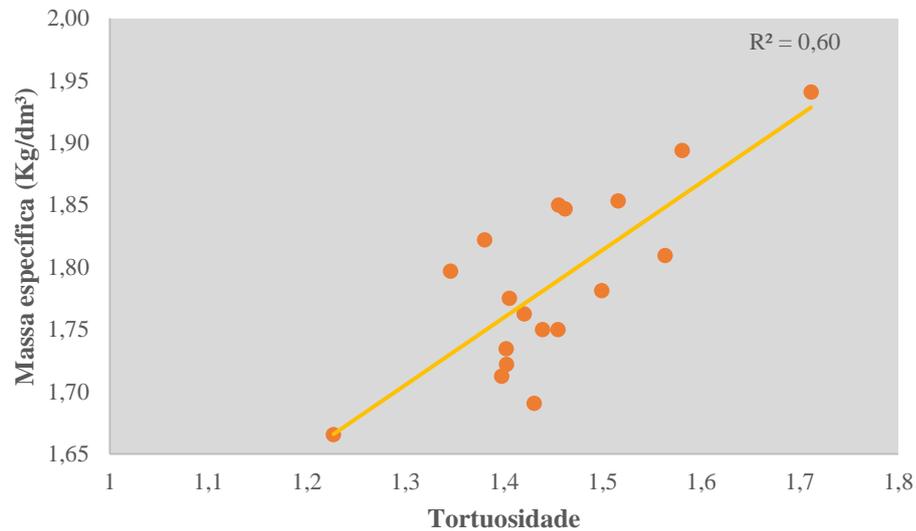
Fonte: o autor (2019).

Comparativamente, as amostras M2 apresentam até 20% mais poros que M1 – 281, em média, e 224 em M1. Além disso, os poros em M2 são em média até 30% menores que em M1: os poros em M2 possuem até 1.14 mm<sup>2</sup> de área média, versus 1.31 mm<sup>2</sup> dos poros de M1. Tais resultados ratificam o que foi observado anteriormente: as amostras do segundo grupo granular apresentam mais poros, porém menores, com potencial de percolação de fluidos limitado – conforme pode ser observado na análise de permeabilidade. Acrescenta-se, ainda, que as amostras em M2 são até 4% mais tortuosas que M1, e tal referência dificulta a percolação de fluidos.

Por último, correlacionou-se massa específica e tortuosidade (Figura 4.15). Observou-se que a massa específica e a tortuosidade são correlacionadas diretamente: quanto maior a massa específica experimental, maior a tortuosidade da matriz de concreto. Verificou-se também moderada linearidade entre os dois parâmetros, com R<sup>2</sup> igual a 0.60. Constatou-se, desse modo,

que as duas variáveis apresentam razoável correlação entre si, e conseqüentemente com o potencial de permeabilidade das matrizes de concreto permeável.

Figura 4.15 – Relação entre massa específica experimental e tortuosidade.



Fonte: o autor (2019).

#### 4.6.3 ANÁLISE DE POROS SUPERFICIAIS POR MÉTODO DE PDI

Realizou-se, a seguir, análise de poros superficiais com uso de PDI. Os registros convertidos no ImageJ, estão agrupados no ANEXO C deste documento. A caracterização dos poros, por sua vez, está agrupada na Tabela 7.

Tabela 7 – Caracterização de poros superficiais.

<b>Amostra</b>	<b>Contagem de poros</b>	<b>Área total de poros (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Tamanho médio de poros (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Área percentual de poros (%)</b>	<b>Perímetro (mm)</b>
<b>M1.1</b>	137	1.014	7.40	10.36	11.87
<b>M1.2</b>	152	903	5.94	9.37	10.58
<b>M1.3</b>	155	893	5.76	9.80	10.33
<b>M1.4</b>	117	948	8.10	9.87	12.48
<b>M1.5</b>	119	925	7.77	10.44	12.67
<b>M1.6</b>	106	1.082	10.21	10.95	15.30
<b>M1.7</b>	145	1.024	7.06	10.46	11.84
<b>M1.8</b>	165	909	5.51	9.35	10.25
<b>M1.9</b>	146	872	5.97	9.25	11.33
<b>M2.1</b>	292	830	2.84	8.81	7.53
<b>M2.2</b>	298	631	2.12	6.73	6.24
<b>M2.3</b>	221	598	2.71	6.19	6.87
<b>M2.4</b>	300	435	1.45	4.94	4.80
<b>M2.5</b>	287	649	2.26	6.73	6.33
<b>M2.6</b>	252	674	2.67	7.65	6.97
<b>M2.7</b>	255	849	3.33	8.68	8.01
<b>M2.8</b>	287	783	2.73	8.44	7.27
<b>M2.9</b>	238	666	2.80	7.86	7.27

Fonte: o autor (2019).

As amostras de M1 apresentaram média de 138 poros superficiais, diante de 270 poros superficiais em M2. Apesar de ter apresentado quase o dobro de poros em números absolutos, as amostras M2 apresentaram área total de poros superficiais até 30% menor. Além disso, os poros em M1 apresentaram tamanho médio praticamente 3 vezes superior ao tamanho médio dos poros do segundo grupo granulométrico.

Comparativamente, os poros menores em M2, juntamente com os nichos impermeáveis identificados no interior das matrizes de concreto (Figura 4.14), limitaram o potencial de entrada e percolação de fluidos nas amostras do segundo grupo granulométrico. A redução de permeabilidade, no entanto, não foi devidamente representada pelo aumento de resistência mecânica das amostras, que apesar de terem apresentado resistência à tração na flexão superior ao que fora observado nas amostras de M1, não a tiveram na mesma proporção que as limitações de percolação de fluidos.

#### 4.7 CORRELAÇÕES E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Foram realizados, finalmente, procedimentos estatísticos com a finalidade de comparar resultados experimentais, bem como avaliar interações entre os parâmetros de controle desse estudo. Inicialmente, foram realizados testes de normalidade com os resultados de resistência à tração na flexão, permeabilidade e massa específica. Como todos esses parâmetros apresentaram características que indicassem para comportamento normal, realizou-se análise de variância ANOVA para três fatores.

Desenvolveu-se, então, uma tabela ANOVA entre as variáveis de controle desse estudo, afim de determinar a quais variáveis independentes as variações de resultados observadas estariam mais fortemente relacionadas: às combinações granulométricas e de compacidade (A), à relação a/c (B), ao teor de pasta de cimento (C) ou às interações intrínsecas dessas variáveis. Os resultados da ANOVA foram agrupados na Tabela 8.

Tabela 8 - ANOVA para definição de parâmetros de maior influência sobre resultados experimentais.

Experimento	Fonte de variação	SQ	GDL	MQ	Teste F	F.tab	
Resistência à tração na flexão	A	2,61	1	2,61	12,28	7,71	<b>DS</b>
	B	0,42	2	0,21	0,99	6,94	DNS
	C	0,44	2	0,22	1,03	6,94	DNS
	AB	6,11	2	3,06	14,37	6,94	<b>DS</b>
	AC	0,18	2	0,09	0,42	6,94	DNS
	BC	1,70	4	0,42	1,99	6,39	DNS
	ABC	1,13	4	0,28	1,33	6,39	DNS
	Erro	0,85	4	0,21			
	<b>Total</b>	13,45					
	Fonte de variação	SQ	GDL	MQ	Teste F	F.tab	
Permeabilidade	A	812,08	1	812,08	155,63	7,71	<b>DS</b>
	B	352,53	2	176,27	33,78	6,94	<b>DS</b>
	C	69,12	2	34,56	6,62	6,94	DNS
	AB	343,10	2	171,55	32,88	6,94	<b>DS</b>
	AC	39,02	2	19,51	3,74	6,94	DNS
	BC	119,12	4	29,78	5,71	6,39	DNS
	ABC	47,84	4	11,96	2,29	6,39	DNS
	Erro	20,87	4	5,22			
	<b>Total</b>	1803,69					

Fonte: o autor (2019).

Verificou-se que a granulometria (variável A), bem como a interação entre a granulometria e a relação a/c (relação AB), influenciaram fortemente os resultados experimentais de resistência à tração na flexão. Os resultados se contrapõem ao estudo de Zheng et al. (2012), que identificaram a influência da interação entre pasta de cimento e o esqueleto granular como fatores determinantes sobre a resistência do concreto permeável.

Com relação à permeabilidade, verificou-se que o esqueleto granular (variável A), bem como a relação a/c (variável B) e a interação entre as duas variáveis (relação AB), apresentam influência significativa sobre a permeabilidade da matriz de concreto. Os resultados apresentam contraponto ao que fora obtido nos estudos desenvolvidos por Chandrappa e Biligiri (2016) e Torres, Hu, e Ramos (2015b), que observaram a interação entre pasta de cimento e esqueleto granular como os fatores que mais influenciam sobre a permeabilidade da matriz de concreto permeável.

Aplicou-se, então, a correlação linear entre as variáveis de interesse desse estudo através do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) (Figueiredo-Filho e Júnior (2009), afim de atestar ou excluir relações de proporção entre os resultados obtidos (Tabela 9). Considerou-se, para tal, que coeficientes de correlação iguais ou maiores que 0.70 representam elevado grau de associação entre os valores, coeficientes entre 0.40 e 0.69 representam correlação moderada, e coeficientes menores que 0.40 representam frágil correlação entre as variáveis analisadas. Avaliou-se, ainda, as correlações como positivas ou negativas.

Tabela 9 – Grau de correlação linear entre as variáveis.

Variável 1	Variável 2	r	Correlação	Tipo	Variância (r <sup>2</sup> )
<b>Tortuosidade</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b>	0,51	Moderada	Positiva	0,26
<b>Porosidade total</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b>	-0,52	Moderada	Negativa	0,26
<b>Massa específica experimental</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b>	0,71	Elevada	Positiva	0,50
<b>Total de poros internos</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b>	0,23	Frágil	Positiva	0,05
<b>Tamanho médio de poros internos</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b>	-0,19	Frágil	Negativa	0,04
<b>Percentual em área de poros internos</b>	<b>Resistência à tração na flexão</b>	0,18	Frágil	Positiva	0,03
<b>Tortuosidade</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade</b>	-0,66	Moderada	Negativa	0,44
<b>Porosidade total</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade</b>	0,67	Moderada	Positiva	0,45
<b>Massa específica experimental</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade</b>	-0,87	Elevada	Negativa	0,66
<b>Total de poros internos</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade</b>	-0,35	Frágil	Negativa	0,12
<b>Tamanho médio de poros internos</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade</b>	0,39	Frágil	Positiva	0,15
<b>Percentual em área de poros internos</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade</b>	0,01	Frágil	Positiva	0,00
<b>Resistência à tração na flexão</b>	<b>Coefficiente de permeabilidade</b>	-0,65	Moderada	Negativa	0,42

Fonte: o autor (2019).

Os valores obtidos para o coeficiente de Pearson reforçam o entendimento de correlação entre a massa específica e propriedades mecânicas e hidráulicas das amostras deste estudo, estando esta logicamente associada de maneira positiva à resistência à tração na flexão, e negativamente à permeabilidade. O quadrado do r de Pearson resulta variância, que representa a probabilidade de os resultados obtidos estarem relacionados às correlações feitas (DANCEY e VIALI, 2018). Ou seja, há pelo menos 66% de probabilidade de que os resultados de permeabilidade obtidos experimentalmente estejam associados à massa específica do material, enquanto pelo menos 50% dos resultados experimentais de resistência à tração na flexão podem ser associados à correlação linear desta com a massa específica da amostra.

Destaca-se ainda a moderada relevância da tortuosidade para a permeabilidade (até 44% dos resultados experimentais de permeabilidade podem ser associados à variação da tortuosidade das amostras): quanto mais tortuosa a matriz granular, maior o tempo de

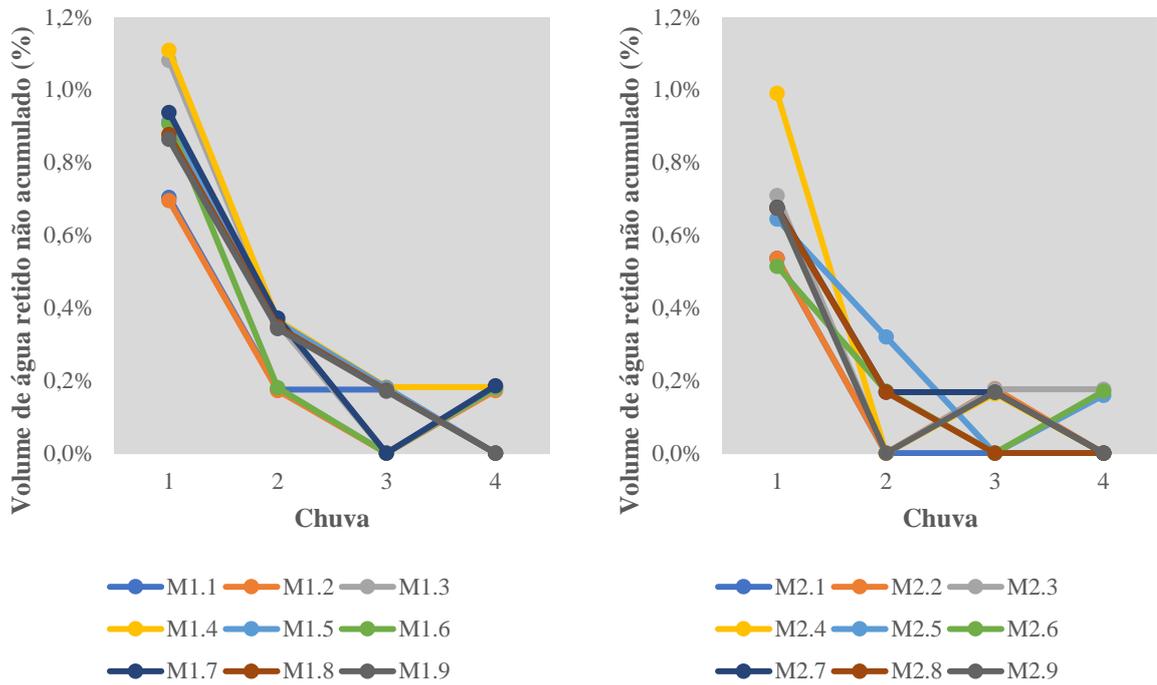
percolação da água, e menor a permeabilidade. Entre os resultados obtidos, destaca-se, portanto, que:

- a) A relação a/c e o esqueleto granular, representado pelo grau de compactidade obtido para cada mistura binária, foram os fatores que apresentaram maior influência sobre permeabilidade e resistência em concretos permeáveis, dentre as variáveis consideradas nesse estudo;
- b) A fluidificação da pasta de cimento pela variação da relação a/c acarretou a redução da permeabilidade da matriz de concreto sem indicar, necessariamente, aumento de resistência. Tal resultado foi associado à colmatação interna e formação de nichos de pasta de cimento nas matrizes de concreto, que coibiram o potencial de permeabilidade das amostras, sem contribuir para aumento de desempenho mecânico;
- c) A massa específica do concreto permeável apresenta relevante correlação linear com a variação de permeabilidade e resistência de concretos permeáveis, conforme ratificado pelos elevados valores do coeficiente de Pearson. Notou-se, ainda, que esqueletos granulares mais compactos apresentam maior variação na densidade para a mesma variação de resistência.
- d) A variação da pasta de cimento, em consumo de cimento e água, por sua vez, resultou em comportamentos distintos e inversos para combinações granulométricas diferentes. Os resultados são interessante a nível de dosagem de sistemas drenantes que apresentem como proposta a incorporação de coberturas de concreto permeável, de modo que seja otimizado o processo para obtenção de misturas mais resistentes, mantendo o potencial de percolação de fluidos.

#### **4.8 SIMULAÇÃO DE PLACAS DE CONCRETO SUBMETIDAS À AÇÃO DE CHUVAS INTENSAS**

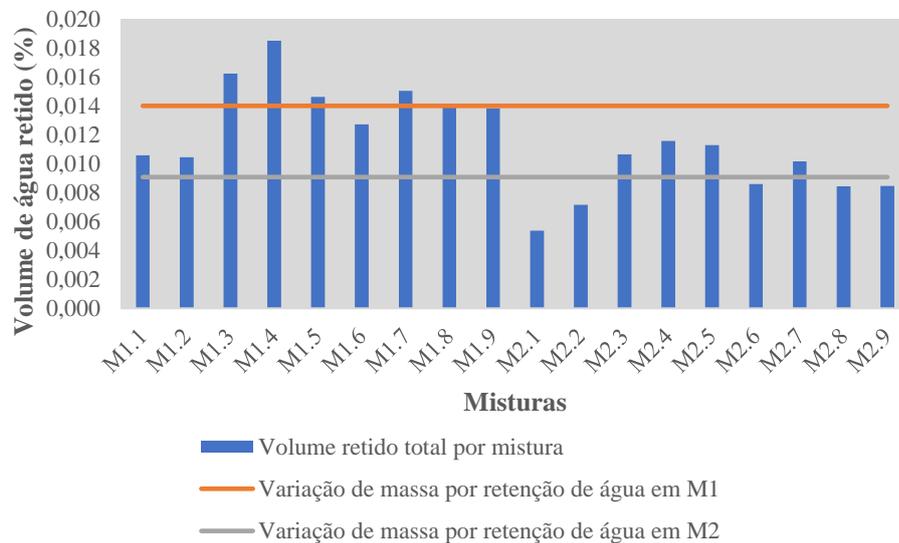
Foram realizados testes que simularam a ação de chuvas intensas sobre as placas de concreto permeável. A Figura 4.16 reúne o comportamento das amostras quanto ao ganho de massa pela retenção de água, em relação a cada evento de chuva anterior. A Figura 4.17, por sua vez, apresenta as relações de volume retido absoluto em cada amostra.

Figura 4.16 – Relação entre volume retido e número de chuvas intensas aplicadas.



Fonte: o autor (2019).

Figura 4.17 – Volume retido total em cada amostra.

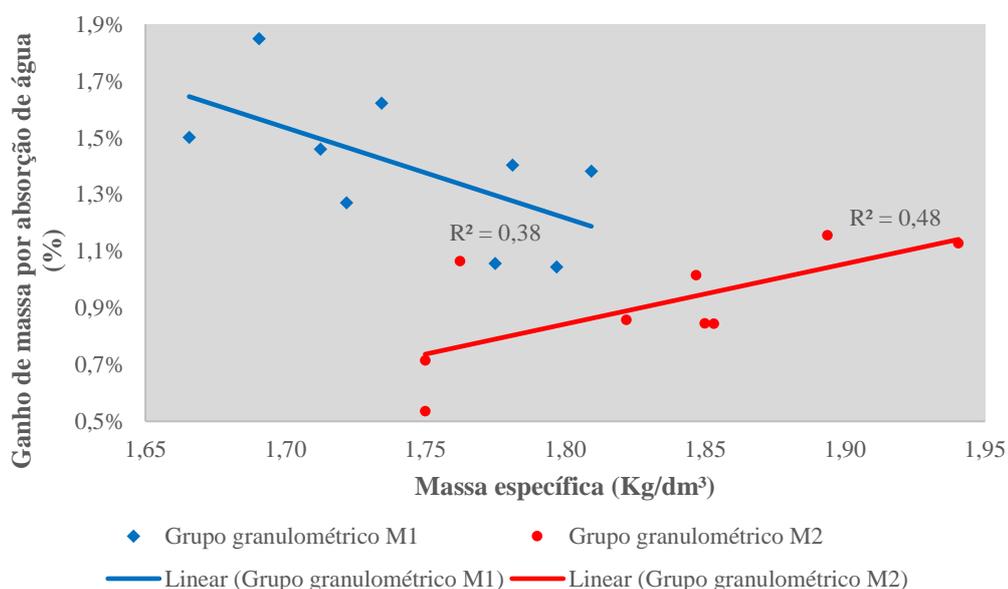


Fonte: o autor (2019).

Na Figura 4.15, como esperado, o potencial de retenção de água foi maior durante a primeira chuva intensa, e decresceu conforme eram simulados outros eventos de chuva. Além disso, as amostras do primeiro grupo granulométrico apresentaram maior percentual de retenção de água (Figura 4.16): em M1, as amostras apresentaram em média 1.40% de ganho de massa

relacionado à retenção de água, após os 4 eventos de chuvas intensas. As amostras M2, por sua vez, apresentaram 0,91% de ganho de massa após os 4 eventos de chuvas intensas – comparativamente, uma diferença de 35% de um grupo granulométrico para o outro. Tal resultado também era esperado, visto que as amostras do primeiro grupo granulométrico apresentam poros maiores, com maior potencial de absorção e acúmulo de fluidos. Comparou-se, então, o percentual retido com as médias de massas específicas experimentais dos materiais, com a finalidade de avaliar a interação entre tais parâmetros (Figura 4.18).

Figura 4.18 – Relação entre potencial de absorção e retenção de água e massa específica.



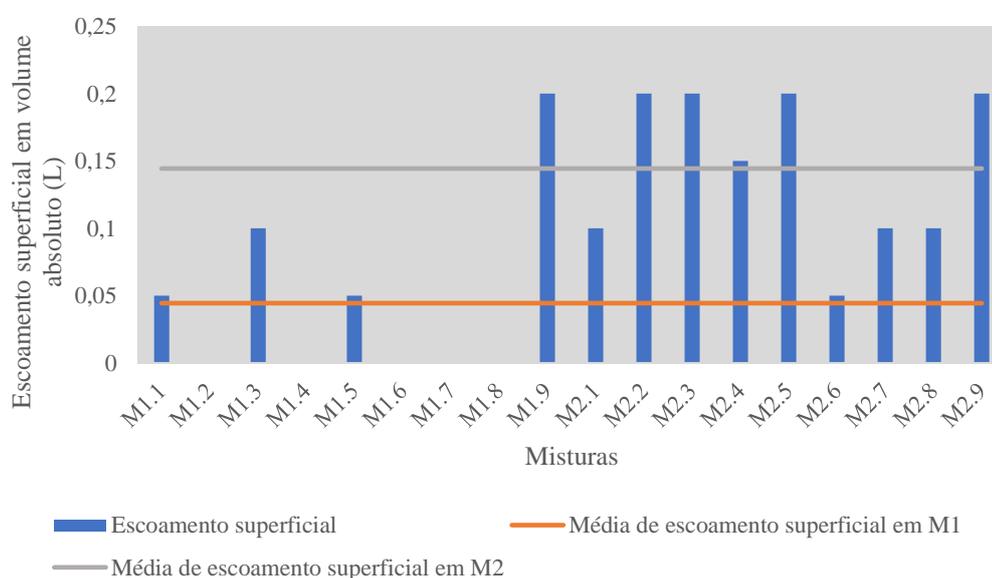
Fonte: o autor (2019).

Verificou-se que as amostras dos dois grupos granulométricos apresentaram características distintas quanto à variação de massa específica e potencial de armazenamento de água: no primeiro grupo granulométrico (M1), o aumento da massa específica reduziu o potencial de absorção de água. Tal resultado foi associado à redução do diâmetro de poros, o que limitou a capacidade de armazenamento de fluidos.

Nas amostras do segundo grupo granulométrico (M2), o aumento da massa específica potencializou a capacidade de armazenamento de água nas matrizes de concreto. Tal comportamento foi associado a alguns fatores: devido à maior área superficial interna (conforme observado na Tabela 7), o aumento de massa específica potencializou a superfície de absorção; além disso, o aumento de massa específica esteve associado diretamente com o aumento da tortuosidade, que dificultou a percolação de água através da matriz de concreto e facilitou, em consequência, a retenção de água.

Foi avaliado, a seguir, o volume de água escoado superficialmente durante os eventos de chuva. Analisando a Figura 4.19, é possível notar algumas particularidades dos resultados obtidos, dentre os quais se pode destacar: todas as amostras do segundo grupo granulométrico apresentaram vestígios de escoamento superficial, o que leva à evidente conclusão de que a redução da granulometria utilizada teve grande influência sobre a incidência de águas escoadas superficialmente; além disso, destaca-se que, em média, as amostras M2 apresentaram volume de água escoado superficialmente cerca de 3 vezes maior que as amostras de M1.

Figura 4.19 – Ocorrência de escoamento superficial.



Fonte: o autor (2019).

Realizou-se, finalmente, cálculo do coeficiente de Pearson para avaliação do grau de correlação linear entre as variáveis experimentais obtidas ao longo do estudo e variáveis específicas dos testes de chuva. Os resultados estão agrupados na Tabela 10.

Tabela 10 – Correlação linear para os resultados obtidos no experimento de simulação de chuva.

<b>Relação 1</b>	<b>Relação 2</b>	<b>r</b>	<b>Correlação</b>	<b>Tipo</b>	<b>Variância</b>
<b>Absorção e retenção de água</b>	<b>Massa específica</b>	-0,41	Moderada	Negativa	0,17
<b>Absorção e retenção de água</b>	<b>Porosidade efetiva</b>	0,19	Fraca	Positiva	0,04
<b>Absorção e retenção de água</b>	<b>Porosidade total</b>	0,12	Fraca	Positiva	0,02
<b>Absorção e retenção de água</b>	<b>Permeabilidade</b>	0,47	Moderada	Positiva	0,22
<b>Absorção e retenção de água</b>	<b>Tortuosidade</b>	-0,00	Fraca	Negativa	0,00
<b>Absorção e retenção de água</b>	<b>Escoamento superficial</b>	-0,39	Fraca	Negativa	0,15
<b>Absorção e retenção de água</b>	<b>Área total de poros internos</b>	0,15	Fraca	Positiva	0,02
<b>Absorção e retenção de água</b>	<b>Área total de poros superficiais</b>	0,44	Moderada	Positiva	0,19
<b>Escoamento Superficial</b>	<b>Massa específica</b>	0,51	Moderada	Positiva	0,32
<b>Escoamento Superficial</b>	<b>Porosidade efetiva</b>	-0,58	Moderada	Negativa	0,34
<b>Escoamento Superficial</b>	<b>Porosidade total</b>	-0,55	Moderada	Negativa	0,30
<b>Escoamento Superficial</b>	<b>Permeabilidade</b>	-0,50	Moderada	Negativa	0,25
<b>Escoamento Superficial</b>	<b>Tortuosidade</b>	0,57	Moderada	Positiva	0,32
<b>Escoamento Superficial</b>	<b>Área total de poros internos</b>	-0,01	Fraca	Negativa	0,00
<b>Escoamento Superficial</b>	<b>Área total de poros superficiais</b>	-0,70	Forte	Negativa	0,49
<b>Escoamento Superficial</b>	<b>Tamanho médio de poros superficiais</b>	-0,65	Moderada	Negativa	0,43

Fonte: o autor (2019).

Conforme discutido anteriormente, a massa específica apresenta moderada correlação com o potencial de retenção de águas pluviais, de acordo com as simulações realizadas. Cabe destacar que, como M1 e M2 apresentaram comportamentos distintos diante do aumento de massa específica nas amostras, é possível que a correlação tenha sido, até certo ponto, minimizada, visto que dentro de um mesmo grupo amostral em análise, parte dos resultados apresentaram comportamentos contrastantes e até mesmo inversos entre si.

O escoamento superficial, por sua vez, relaciona-se com diversas variáveis a níveis moderados, destacando-se a relação negativa moderada com a porosidade ( $r = 0.58$ ) e com a tortuosidade ( $r = 0.57$ ). A tortuosidade e a porosidade estão relacionadas, desse modo, com a dificuldade de percolação de água e o aumento de escoamento superficial. Cabe destacar que foram realizadas correlações com propriedade de poros superficiais obtidos por meio de PDI. Identificou-se que a ocorrência de escoamento superficial nas amostras de concreto permeável deste estudo pode ser fortemente correlacionada com a área total de poros superficiais ( $r = -0.70$ ), e até 43% dos resultados experimentais de escoamento superficial registrados podem ser

relacionados com a porosidade total da superfície porosa. O escoamento superficial correlaciona-se moderadamente, também, com o tamanho dos poros superficiais ( $r = - 0.65$ ).

Foram selecionados os fatores mais pertinentes nesse estudo para a aplicabilidade e usabilidade de pavimentos de concreto permeável: coeficiente de escoamento superficial, permeabilidade, resistência à tração na flexão e consumo de materiais cimentícios. Cada parâmetro foi dividido em quatro intervalos iguais, e a cada intervalo foi atribuído um valor numérico que variou de 1 a 4 asteriscos, em função do quão positivo cada fator poderia ser para o desempenho do material.

A resistência à tração na flexão variou de 1.43 MPa a 2.42 MPa – intervalo de 0.99 MPa. O intervalo foi dividido em 4 partes iguais (1.43 a 1.68, 1.68 a 1.93, 1.93 a 2.17 e 2.17 a 2.42 MPa), e organizado em ordem crescente (porque a resistência à tração na flexão é uma variável de resposta positiva para o desempenho do material): a amostras que obtiveram resistência dentro do primeiro – e menor – intervalo, associou-se 1 asterisco. O mesmo procedimento foi repetido para a permeabilidade, por ser considerada como um fator positivo – quanto mais permeável, melhor. Ao consumo de materiais e ao coeficiente de escoamento superficial, por sua vez, realizou-se o mesmo procedimento, mas considerou-se tais variáveis como um fatores negativos para a aplicabilidade do material. Ou seja, às amostras inseridas dentro do menor intervalo de consumo de materiais cimentícios e escoamento superficial, associou-se a nota de 4 asteriscos, e assim sucessivamente, até completar o ranqueamento. Os parâmetros estão agrupados no Quadro 5.

Quadro 5 – Fatores pertinentes para pavimentos de concreto permeável.

Amostra	Coefficiente de escoamento superficial	Resistência à tração na flexão	Permeabilidade	Consumo de materiais cimentícios	Recomendação de uso em função da resistência à tração na flexão
M1.1	E	E	O	O	Tráfego de veículos leves
M1.2	E	E	O	B	Tráfego de veículos leves
M1.3	O	E	O	R	Tráfego de veículos leves
M1.4	E	O	E	E	Tráfego de veículos leves
M1.5	E	R	O	O	Tráfego de pessoas
M1.6	E	R	O	R	Tráfego de pessoas
M1.7	E	R	E	E	Tráfego de pessoas
M1.8	E	E	O	O	Tráfego de veículos leves
M1.9	R	O	B	B	Tráfego de veículos leves
M2.1	O	R	O	O	Tráfego de pessoas
M2.2	R	B	O	B	Tráfego de pessoas
M2.3	R	R	O	R	Tráfego de pessoas
M2.4	B	E	R	E	Tráfego de veículos leves
M2.5	R	E	R	O	Tráfego de veículos leves
M2.6	E	O	R	R	Tráfego de veículos leves
M2.7	O	E	R	E	Tráfego de veículos leves
M2.8	O	E	R	O	Tráfego de veículos leves
M2.9	R	E	R	B	Tráfego de veículos leves

E: Desempenho excelente; O: Desempenho ótimo; B: Desempenho bom; R: Desempenho regular.

Fonte: O autor (2019).

A maioria das amostras do grupo granulométrico M1 apresentaram desempenho de ótimo a excelente em relação à ocorrência de escoamento superficial e ao grau de permeabilidade. Destaca-se as amostras M1.4, M1.1. e M1.8 que apresentaram, em média, os melhores índices dentre todas as variáveis analisadas. No extremo oposto, as amostras M2.3, M2.9, M2.2 e M1.9 apresentaram as piores relações de desempenho, relacionando-se principalmente com os elevados coeficientes de escoamento superficial de tais amostras.

#### **4.9 POTENCIAL DE APLICAÇÃO DE COBERTURAS DE CONCRETO PERMEÁVEL EM MICROBACIA METROPOLITANA**

Finalmente, foram realizadas estimativas para definição do potencial uso de coberturas drenantes de concreto permeável para apaziguar focos de enchentes e alagamentos no município de Belém. Esta etapa teve como objetivo complementar as informações experimentais obtidas

ao longo do estudo, principalmente resultados práticos associados à capacidade de reduzir escoamento superficial e armazenar águas pluviais. A área de análise corresponde à microbacia do canal da rua 3 de maio (Figura 4.20).

Figura 4.20 – Registros do canal da 3 de maio.



Fonte: o autor (2019).

Para isso, a área de interesse foi inicialmente caracterizada quanto a propriedades físicas e morfológica, que podem ser observadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Caracterização da microbacia de análise.

<b>Variáveis</b>	
<b>Comprimento do rio principal (km)</b>	0,88
<b>Comprimento do eixo (L)</b>	2,07
<b>Área da Bacia</b>	2,15
<b>Perímetro</b>	8,26
<b>Fator de forma (Kf)</b>	0,50
<b>Coefficiente de Compacidade (Kc)</b>	1,58
<b>Índice de Conformação (Ic)</b>	0,40
<b>Densidade de Drenagem (Dd)</b>	0,61
<b>Coefficiente de Torrencialidade (Ct)</b>	8,79
<b>Elevação máxima</b>	28,00
<b>Elevação mínima</b>	6,00
<b>Elevação Média</b>	13,82
<b>Declividade Média (%)</b>	2,65
<b>Declividade Máxima (%)</b>	15
<b>Declividade Mínima (%)</b>	0,00

Fonte: o autor (2019).

Destaca-se, dentre os resultados:

- O fator de forma (Kf) apresentou como resultado 0.50. Um baixo valor para o fator de forma estabelece que há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda a extensão da bacia, o que leva à conclusão de que há, em teoria, baixo risco de inundação naquela região.
- Observou-se Kc igual a 1,58. Tal valor, associado com o resultado encontrado para o fator de forma, representa que, em condições normais de precipitação, a bacia é pouco suscetível a enchentes;
- O resultado obtido para o Índice de Conformação (Ic) (0.40) atestou a baixa probabilidade de que fossem observadas enchentes frequentes naquela bacia (Santos et al., 2012);
- A densidade de drenagem (Dd) é um bom indicativo do grau de desenvolvimento de um sistema de drenagem. Nesse caso, a bacia em questão apresenta, portanto, sistemas de drenagem apontados como regulares, próximos de pobres.
- Conforme o resultado obtido para o Coeficiente de Torrencialidade (Ct) (8.79), pode-se concluir que os focos de inundações e alagamentos identificados naquela região,

em estudos anteriores, podem ser correlacionados com os elevados índices pluviométricos e com o coeficiente de torrencialidade calculado;

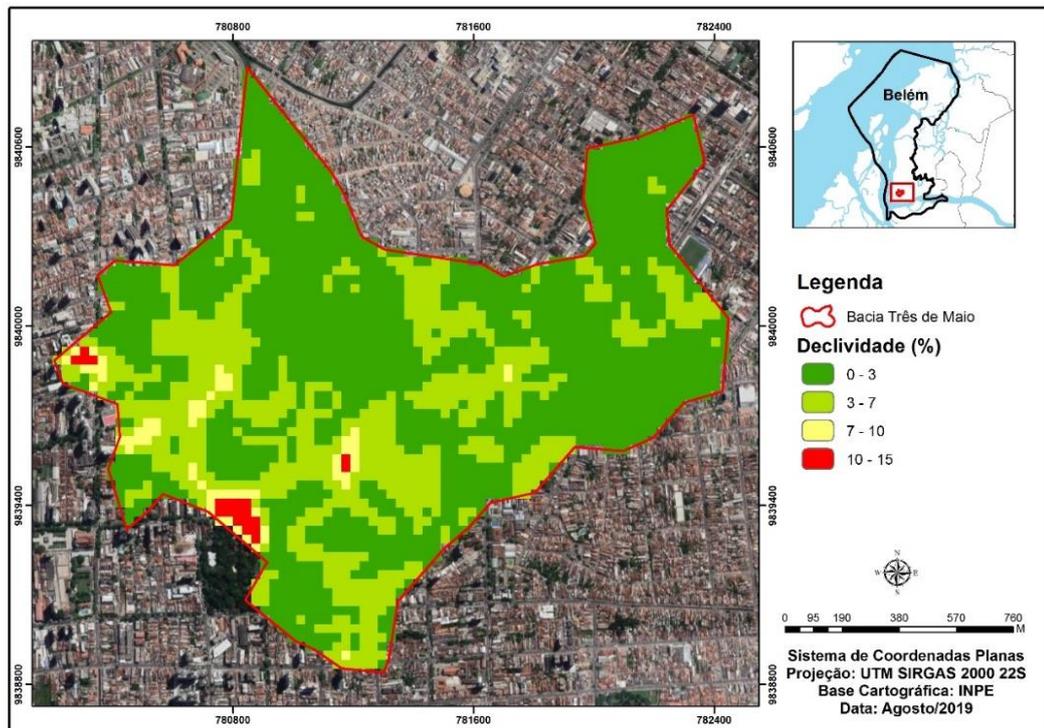
- Observa-se, finalmente, a relação de declividades na área: as declividades ideais, segundo Mascaró (2008), estão compreendidas entre 2% e 8%. Declividades menores criam problemas de sedimentação pela baixa velocidade de escoamento das águas superficiais, principalmente quando são considerados sistemas de drenagem tradicionais. Declividades maiores que 8% aumentam a velocidade de escoamento, resultando em um processo erosivo ou em fonte de descargas, como impacto sobre terras a jusante, além de facilitar, quando associadas com a elevada impermeabilização superficial e a ineficiência de sistemas de drenagem de águas superficiais, a ocorrência de inundações e alagamentos.

Para analisar os resultados obtidos inicialmente, é necessário que se faça uma abordagem integrada dos parâmetros mais relevantes: de acordo com resultados obtidos para o coeficiente de compacidade e índice de conformação, por exemplo, a área de análise em questão apresenta baixos riscos de inundações – do ponto de vista morfológico da sub bacia.

No entanto, quando são observados parâmetros relacionados ao avanço de infraestrutura de drenagem, os resultados apontam que a área apresenta sistemas de drenagem de regulares a pobres. Associado a isso, tem-se um coeficiente de torrencialidade relativamente elevado que, associado às taxas pluviométricas anuais características da região, possivelmente contribuem para a ocorrência de fenômenos de alagamentos e enchentes.

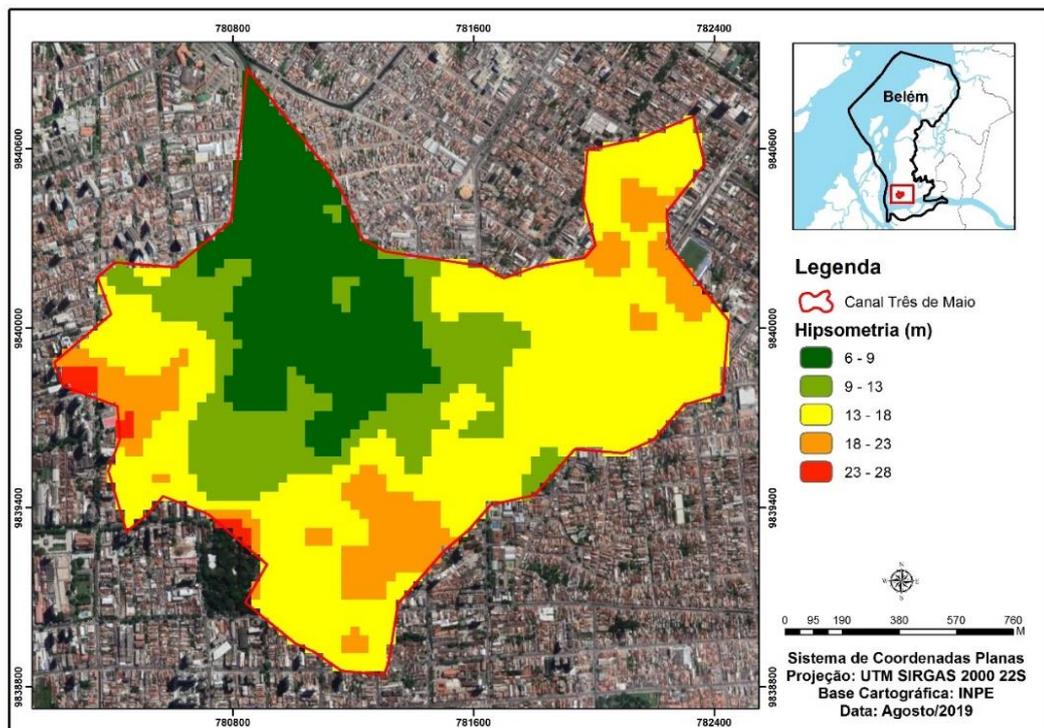
A seguir, foram desenvolvidos mapas de caracterização de declividade (Figura 4.21), hipsometria (Figura 4.22) e padrão de uso e ocupação do solo (Figura 4.23). Destaca-se que a região apresenta declividade variando de 0 a 7% em praticamente toda a sua extensão. Além disso, o mapa de caracterização hipsométrica revelou que as cotas mais baixas (6 a 9 m) estão localizadas à jusante do canal da 3 de maio.

Figura 4.21 – Mapa de declividade.



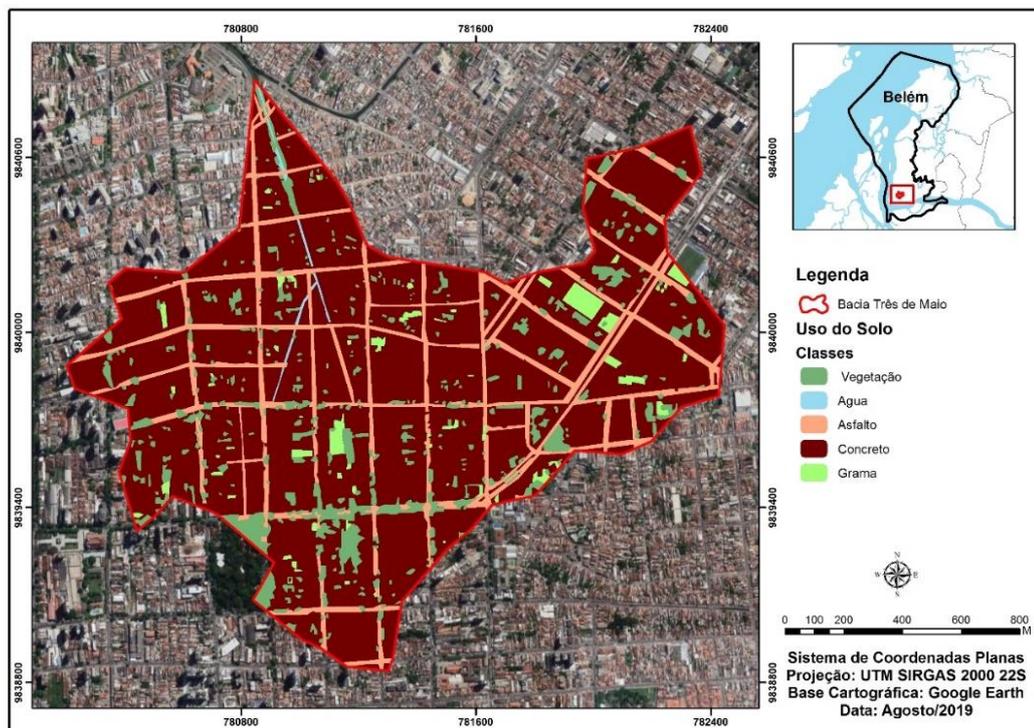
Fonte: o autor (2019).

Figura 4.22 – Mapa hipsométrico.



Fonte: o autor (2019).

Figura 4.23 - Mapa de uso e ocupação do solo.



Fonte: o autor (2019).

Com relação ao padrão de uso e ocupação do solo, é possível observar que praticamente toda a extensão da região é composta por áreas impermeáveis de concreto e asfalto. A Tabela 12, a seguir, apresenta a distribuição de coberturas da região, onde verifica-se que apenas 9.6% da área total analisada é composta por vegetação.

Tabela 12 – Distribuição de áreas na região analisada.

Classes	Área (m <sup>2</sup> )	Área (%)
<b>Grama</b>	47529.82	2.20
<b>Asfalto</b>	275394.82	12.75
<b>Concreto</b>	1622061.74	75.12
<b>Água</b>	7524.94	0.35
<b>Vegetação</b>	206644.92	9.57

Fonte: o autor (2019).

É importante ressaltar que Santos (2017) observou que toda a bacia do Una, na qual a área de análise está inserida, apresenta área vegetada, com potencial de percolação direta da água superficial no solo, de apenas 18.7%. Ainda segundo Santos (2017), levando em consideração o crescimento urbano e a densificação demográfica das últimas décadas, o percentual de

permeabilidade aceitável estaria entre 20 e 25% da área total de uma região densamente impermeabilizada.

Conclui-se, desse modo, que a região analisada nesse estudo apresenta em torno de 60% do que pode ser considerado como o mínimo de permeabilidade aceitável para uma área densamente urbanizada. É importante ressaltar, ainda, que nem todas as coberturas vegetadas contribuirão adequadamente para a drenagem de águas superficiais (VALENSKI e CHANDLER, 2015; FERREIRA, 2017), o que ratifica a necessidade de que sejam implementadas soluções de drenagem.

A partir do exposto, foram realizadas diversas estimativas de substituição de coberturas impermeáveis de concreto e asfalto por coberturas drenantes de concreto permeável. Para isso, foram feitas algumas considerações: Excluiu-se das estimativas toda área com hipsometria até 9 metros, afim de evitar que os pavimentos permeáveis ficassem muito próximos do lençol freático (considere-se as simplificações feitas para que as estimativas tivessem resultados mais verossímeis), e próximos de uma zona suscetível a focos de alagamento, que poderiam comprometer, a médio e longo prazo, o funcionamento adequado das coberturas porosas; padronizou-se (conforme mencionado durante o programa experimental) vias de asfalto com largura padrão de 12 metros, equipadas com vias para tráfego de pedestres dos dois lados, sendo cada calçada com largura padrão de 1.2 metros.

Definiu-se, então, o coeficiente de escoamento superficial de cada uma das coberturas, conforme estabelecido em Chow, Maidment e May (1988), para tempo de retorno de 25 anos: superfícies de concreto, 0.88; superfícies de asfalto, 0.86; e superfícies gramadas, 0.46. Além disso, foram consideradas amostras que apresentaram resistência à tração na flexão de no mínimo 2 MPa, resistência mínima para aplicação de pavimentos permeáveis em vias de tráfego leve, por exemplo, e amostras que apresentaram coeficiente de escoamento superficial igual a zero nas simulações de chuvas intensas.

Os resultados obtidos na etapa experimental e destacados no Quadro 4 foram levados em consideração para o desenvolvimento de estimativas de implementação de placas de concreto permeável em substituição a superfícies impermeáveis de concreto e asfalto. Para substituição de calçadas de concreto por pavimentos permeáveis, por exemplo, foi considerada a amostra M1.7, que não exibiu escoamento superficial quando submetida a chuvas intensas e contínuas, além de ter apresentado excelente permeabilidade e baixo consumo de cimento e, finalmente,

resistência à tração na flexão maior que 1 MPa, conforme recomendado pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

Para vias asfálticas, por outro lado, considerou-se na estimativa o uso de amostras similares a M1.4, por esta não ter apresentado escoamento superficial diante da aplicação de chuvas intensas, além de ter excelente permeabilidade e baixo consumo de cimento, e resistência à tração na flexão acima de 2 MPa, recomendado pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

Calculou-se a vazão total, tendo como base a intensidade de chuva calculada neste estudo (127.53 mm/h), com duração de 15 minutos e tempo de retorno de 25 anos. Os resultados obtidos estão agrupados na Tabela 13, onde foram consideradas substituições de calçadas de concreto impermeável por calçadas concreto permeável.

Tabela 13 – Estimativa de redução de vazão superficial a partir da substituição de calçadas por coberturas de concreto permeável.

<b>Incorporação de pavimento permeável</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Área total (%)</b>	<b>Coefficiente de escoamento superficial</b>	<b>Vazão total (L/s)</b>	<b>Redução de vazão (%)</b>
<b>0%</b>	Concreto	14	0.88	84117.7	-
	Asfalto impermeável	73	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	0	0.00		
<b>10% sobre a área de calçada</b>	Concreto	13	0.88	82790.4	1.58
	Asfalto impermeável	73	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	2	0.00		
<b>20% sobre a área de calçada</b>	Concreto	12	0.88	81463.1	3.16
	Asfalto impermeável	73	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	3	0.00		
<b>30% sobre a área de calçada</b>	Concreto	10	0.88	80135.8	4.73
	Asfalto impermeável	73	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	4	0.00		
<b>40% sobre a área de calçada</b>	Concreto	9	0.88	78808.5	6.31
	Asfalto impermeável	73	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	6	0.00		
<b>50% sobre a área de calçada</b>	Concreto	7	0.88	77481.1	7.89
	Asfalto impermeável	73	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	7	0.00		

Fonte: o autor (2019).

A substituição de calçadas de concreto convencional por camadas de concreto permeável apresentou potencial de redução de aproximadamente 8% da vazão total de águas superficiais. Tal resultado é extremamente promissor, visto que a utilização de coberturas de concreto permeável poderia praticamente dobrar o percentual de coberturas permeáveis disponíveis na região, além de minimizar problemáticas associadas ao escoamento de águas superficiais.

Realizou-se finalmente, estimativa, de substituição de camadas asfálticas por coberturas de concreto permeável. Os resultados estão agrupados na Tabela 14.

Tabela 14 - Estimativa de redução de vazão superficial a partir da substituição de Vias de asfalto por coberturas de concreto permeável.

Incorporação de pavimento permeável	Cobertura	Área total (%)	Coefficiente de escoamento superficial	Vazão total (L/s)	Redução de vazão (%)
<b>0%</b>	Concreto	14	0.88	84117.7	-
	Asfalto impermeável	73	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	0	0.00		
<b>10% sobre a área de asfalto</b>	Concreto	14	0.88	77632	7.71
	Asfalto impermeável	66	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	7	0.00		
<b>20% sobre a área de asfalto</b>	Concreto	14	0.88	71146.2	15.42
	Asfalto impermeável	58	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	15	0.00		
<b>30% sobre a área de asfalto</b>	Concreto	14	0.88	64660.5	23.13
	Asfalto impermeável	51	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	22	0.00		
<b>40% sobre a área de asfalto</b>	Concreto	14	0.88	58174.8	30.84
	Asfalto impermeável	44	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	29	0.00		
<b>50% sobre a área de asfalto</b>	Concreto	14	0.88	51689.1	38.55
	Asfalto impermeável	36	0.86		
	Cobertura vegetada	13	0.46		
	Concreto permeável	36	0.00		

Fonte: o autor (2019).

Por se tratar de uma área muito mais expressiva para a região analisada, percebe-se que a substituição de apenas 10% das vias de asfalto por coberturas de concreto permeável teriam potencial para redução de vazão praticamente no mesmo percentual que fora obtido pela

substituição de 50% das calçadas. Considerando 50% de substituição de vias de asfalto por camadas de concreto permeável, a vazão final poderia ser potencialmente reduzida em até 40%.

Mesmo com a obtenção de resultados promissores, deve-se considerar que não foram consideradas particularidades para a implantação de pavimentos permeáveis na área analisada, nem dificuldades práticas para a manutenção dos pavimentos, ou o tempo necessário para que as coberturas possam ter suas superfícies colmatadas, por exemplo. A abordagem feita, no entanto, teve como objetivo principal avaliar o potencial de aplicação de pavimentos de concreto permeável em regiões caracterizadas por intenso regime pluviométrico, além de estabelecer uma abordagem inovadora, em uma região fortemente afetada por inundações, alagamentos e diversos problemas agregados à ineficiência dos sistemas de drenagem usuais.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo fundamental de avaliar a viabilidade técnica de implementação de pavimentos de concreto permeável em regiões com intenso regime pluviométrico, como é caso do município de Belém. Para isso, foram consideradas como variáveis de controle a granulometria, com duas combinações de faixas granulométricas desenvolvidas a partir do Método de Empacotamento Compressível de Larrard (1999), a relação a/c e o teor de pasta de cimento, resultando em 18 misturas.

As amostras foram testadas quanto à massa específica no estado fresco e endurecido, teor de ar incorporado, coesão entre pasta de cimento e agregados, permeabilidade, porosidade e resistência à tração na flexão. Realizou-se ainda análise detalhada de algumas propriedades dos poros, como dimensão e quantidade de poros internos e superficiais, através de método de Processamento Digital de Imagens (PDI). Os resultados experimentais apresentaram alguns aspectos relevantes, dentre os quais destaca-se:

- A massa específica foi o parâmetro que apresentou maior correlação linear com o comportamento mecânico e hidráulico das amostras – diretamente proporcional ao ganho de resistência e inversamente proporcional à permeabilidade. A partir do coeficiente de correlação linear ( $r$  de Pearson), calculou-se a variância, e obteve-se que até 50% dos resultados de resistência à tração na flexão poderiam ser associados à massa específica das amostras, enquanto 66% do potencial de permeabilidade do material estaria associado à massa específica da matriz de concreto;
- A análise de variância ANOVA indicou que as faixas granulométricas e as relações a/c foram os parâmetros, dentre as variáveis de controle adotadas nesse estudo, que apresentaram maior influência sobre a resistência à tração na flexão e permeabilidade das amostras de concreto permeável.

Além da viabilidade técnica propriamente dita, realizada conforme procedimentos experimentais padronizados, idealizou-se também um experimento para avaliação do comportamento do concreto permeável diante situações de chuvas intensas e repetitivas.

Para isso, montou-se aparelhagem para simulação de chuvas. As amostras foram submetidas a 4 chuvas de 15 minutos, com aproximadamente  $6.3 \text{ L/m}^2/\text{min}^{-1}$  de vazão. Apesar de algumas limitações intrínsecas ao experimento, como por exemplo a altura de queda das gotas, a necessidade de realização em ambiente isolado, sem influência de fatores como partículas sólidas que poderiam aumentar o risco de colmatação das superfícies permeáveis, ou cargas em

atrito associadas ao contato do pavimento com o rolamento de veículos motorizados, algumas conclusões relevantes puderam ser extraídas do experimento:

- Todas as amostras do segundo grupo granulométrico, por ter maior densidade de empacotamento, apresentaram escoamento superficial em algum momento da simulação de chuvas intensas. Tal constatação pode ser evidentemente associada às dimensões dos poros superficiais, que dificultaram a percolação de fluidos;
- O escoamento superficial pode ser correlacionado com diversas variáveis, destacando-se a relação negativa moderada com a porosidade ( $r=0.58$ ) – quanto maior a porosidade, menor a incidência de escoamento superficial - e com a tortuosidade ( $0.57$ ) – quanto maior a tortuosidade, maior a dificuldade de percolação de fluidos, e potencialmente maior a incidência de escoamento superficial. Tal constatação é ratificada pela relação inversa entre tortuosidade e coeficiente de permeabilidade.
- Observou-se que a ocorrência de escoamento superficial pode ser associada com a área total de poros superficiais ( $r= - 0.70$ ) – quanto maior a área total de poros superficiais, menor a incidência de escoamento superficial, e até 43% dos resultados experimentais de escoamento superficial registrados podem ser relacionados com a porosidade total da matriz de concreto.

Foram realizadas, por último, estimativas de desempenho de superfícies de concreto permeável em uma região do município de Belém, considerando-se chuvas de 15 minutos e tempo de retorno de 25 anos. Foram consideradas, na estimativa, duas situações: substituição de vias para tráfego de pedestres por pavimentos de concreto permeável, e substituição de vias para tráfego de veículos leves (vias asfálticas) por pavimentos de concreto permeável.

Os resultados permitem concluir que a tecnologia apresenta grande potencial como alternativa sustentável para atuar como auxiliar aos sistemas tradicionais de drenagem de águas superficiais na região, com significativa redução da vazão. A utilização de pavimentos de concreto permeável potencializaria o percentual de coberturas com capacidade para drenar parte de águas superficiais, o que teria como consequência direta a menor solicitação dos sistemas de macro e micro drenagem em funcionamento, e minimizaria, por conseguinte, a incidência de desastres ambientais associadas a focos de inundações e alagamentos.

Destaca-se, no entanto, a necessidade de que sejam realizados diversos experimentos complementares afim de avaliar a real potencialidade de incorporação de pavimentos

permeáveis em Belém, como, por exemplo, materiais adequados para utilização com sub-base, perspectiva de uso de mantas geotêxteis para evitar a ascensão de finos, além de testes de durabilidade, como colmatação e desgaste superficial por abrasão.

Os resultados obtidos corroboram finalmente para a necessidade de que sejam implementadas soluções duráveis e resilientes, diante de desastres ambientais associados a enchentes e alagamentos urbanos. Destaca-se, ainda, que o presente estudo se fundamentou sobre a perspectiva de expor mecanismos efetivos para fazer frente a focos de inundações e alagamentos, e o uso de pavimentos de concreto permeável apresentou resultados que levam à consideração de que a tecnologia seja uma alternativa potencialmente viável dentre diversas tecnologias sustentáveis, tendo sido apresentada como uma alternativa compreensiva e que contribuirá para a resiliência dos centros urbanos.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Concrete Institute. Pervious Concrete. 2006. ACI-522R-06. Report On Pervious Concretes. Michigan.

American Concrete Institute. Pervious Concrete. 2010. ACI 522R-10. - Report On Pervious Concretes. Michigan.

Acioli, L. A. Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte. 2005. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Lume repositório digital.

Ahern, J. 2011. “Landscape and Urban Planning From Fail-Safe to Safe-to-Fail: Sustainability and Resilience in the New Urban World.” *Landscape and Urban Planning* 100(4):341–43.

Ahiablame, L. M., Engel, B. A., Chaubey, I. 2012. “Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research.” *Water, Air, and Soil Pollution* 223(7):4253–73.

ANA. Hidroweb – Sistemas de informações hidrológicas, 2013. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/>>. Acesso em 31/10/2019.

Associação Brasileira De Cimento Portland (ABCP). 2011. Sistemas construtivos: pavimentos permeáveis. 24p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2001. ABNT NBR NM 51: Agregado graúdo – Ensaio de abrasão “Los Angeles”, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003. ABNT NBR 15220: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003. ABNT NBR NM 248: Agregados- Determinação Da Composição Granulométrica, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2006. ABNT NBR NM 45: Agregados - Determinação Da Massa Unitária e Do Volume de Vazios, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2008. ABNT NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009. ABNT NBR NM 53: Agregado graúdo - determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. 2010. ABNT NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. 2015. ABNT NBR 16416: Pavimentos Permeáveis de Concreto, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2015. ABNT NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - requisitos e procedimentos, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2018. ABNT NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos, Rio de Janeiro: s.n. ABNT.

Bechara, L.A.C. Concreto poroso como revestimento de pavimento permeável: alternativa de drenagem urbana não estrutural à região metropolitana de Belém. UFPa, Programa de pós-graduação em arquitetura e urbanismo. Pará, 2017. Disponível em <http://ppgau.propesp.ufpa.br/index.php/br/teses-e-dissertacoes/dissertacoes/182-2017>. Acesso em 01/07/2018

Bhutta, M. A. R., K. Tsuruta, and J. Mirza. 2012. “Evaluation of High-Performance Porous Concrete Properties.” *Construction and Building Materials* 31:67–73.

Brake, N. A., H. Allahdadi, and F. Adam. 2016. “Flexural Strength and Fracture Size Effects of Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 113:536–43.

Butler D., R. Farmani, G. Fu, S. Ward, K. Diao, M. Astaraie-Imani. 2014. A new approach to urban water management: safe and sure. *Procedia Eng.* 89, 347-354.

Campanharo, W.A. 2010. Diagnóstico físico da bacia do rio Santa Maria do Doce – ES. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Espírito Santo. Jerônimo Monteiro.

Canholi, A.P. 2005. Drenagem Urbana e controle de enchentes. Oficina de textos. São Paulo.

Carneiro, P.R.F., M.G. Miguez. 2011. Controle de inundações em bacias hidrográficas metropolitanas. ANNABLUME editora. São Paulo.

Castro, J.H., Solminihac, C.V., and Bonifacio F. 2009. “Estudio de Dosificaciones En Laboratorio Para Pavimentos Porosos de Hormigón.” *Revista Ingenieria de Construccion* 24(3):271–84.

Chandrappa, A. K. and K. P. Biligiri. 2016. “Pervious Concrete as a Sustainable Pavement Material-Research Findings and Future Prospects: A State-of-the-Art Review.” *Construction and Building Materials* 111:262–74.

Chandrappa, A. K. and K. P. Biligiri. 2018. “Investigation on Flexural Strength and Stiffness of Pervious Concrete for Pavement Applications.” *Advances in Civil Engineering Materials* 7(2):20170015.

Chandrappa, A.K. and K. P. Biligiri. 2016. “Influence of Mix Parameters on Pore Properties and Modulus of Pervious Concrete: An Application of Ultrasonic Pulse Velocity.” *Materials and Structures* 49(12):5255–71.

Chow, V. T., D. R. Maidment, L. W. Mays. 1988. *Applied Hydrology*, McGraw Hill, 572 P.

Chu, L., T. F. Fwa, and K. H. Tan. 2017. “Laboratory Evaluation of Sound Absorption Characteristics of Pervious Concrete Pavement Materials.” (January).

Cormier, N. S. and P. R. M. Pellegrino. 2008. “Infra-Estrutura Verde: Uma Estratégia Paisagística Para a Água Urbana Green Infrastructure: A Natural Systems Approach To Stormwater In.” *Paisagem e Ambiente: Ensaio* 25:127–42.

Ćosić, K., L. Korat, V. Ducman, and I. Netinger. 2015. “Influence of Aggregate Type and Size on Properties of Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 78:69–76.

Damodaram, C., M.H. Giacomoni, C.P. Khedun, H. Holmes, A. Ryan, W. Saour, E.M. Zechman. 2010. Simulation of combined best management practices and low impact

development for sustainable stormwater management. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v.46, i.5.

Dong, X., H. Guo, and S. Zeng. 2017. “Enhancing Future Resilience in Urban Drainage System: Green versus Grey Infrastructure.” *Water Research* 124:280–89.

Ferreira, A.T. 2017. Tempo de enchimento de pavimento permeáveis e poços de infiltração de água pluvial: analogia com fluxo de calor em meios sólidos. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. Campinas.

Figueiredo-Filho, D. B. and J. A. Silva Júnior. 2009. “Desvendando Os Mistérios Do Coeficiente de Correlação de Pearson (R).” *Revista Política Hoje* 18(1):115–46.

Fragoso, G.A., F.P. Silva, J.C.C. Silva, A.F. Alves, B.G.P. Carvalho, 2016. Diagnóstico do sistema de drenagem urbana da cidade de Belém, Pará: uma análise dos principais bairros da cidade. XIV ENEEAmb, II Fórum Latino e I SBEA – Centro-Oeste. Brasília.

Fu, T. C., W. Yeih, J. J. Chang, and R. Huang. 2014. “The Influence of Aggregate Size and Binder Material on the Properties of Pervious Concrete.” *Advances in Materials Science and Engineering* 2014.

Ghafoori, N. 1995. Development of No-fines Concrete Pavement Applications. *Journal of Transportation Engineering*, v. 126, n. 3, 238-288 p.

Goede, W. and L. Haselbach. 2011. “Investigation into the Structural Performance of Pervious Concrete.” *Journal of Transportation Engineering* 138(1):98–104.

Grubeša, I. N., I. Barišić, V. Ducman, and L. Korat. 2018. “Draining Capability of Single-Sized Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 169:252–60.

Ibrahim, A., E. Mahmoud, M. Yamin, and V. C. Patibandla. 2014. “Experimental Study on Portland Cement Pervious Concrete Mechanical and Hydrological Properties.” *Construction and Building Materials* 50:524–29.

Institut gradevinarstva hrvatske. 2001. General technical conditions for roadworks. Zagreb.

Jabur A. S., F. Dornelles, A.L.L. Silveira, J.A. Goldenfum, C.P.M. Okawa, R.R. Gasparini. 2015. Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 20, n. 4, p. 937 – 945, Porto Alegre.

James, W. and H. von Langsdorff. 2003. “The Use of Permeable Concrete Block Pavement in Controlling Environmental Stressors in Urban Areas.” *Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Block Paving (October)*:1–8.

Kevern, J. T., V. R. Schaefer, and K. Wang. 2011. “Mixture Proportion Development and Performance Evaluation of Pervious Concrete for Overlay Applications.” *ACI Materials Journal*, Title no. 108-M47.

Kevern, J.T., K.Wang, V.R. Schaefer. 2010. Effect of coarse aggregate on the freeze-thaw durability of permeable concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 22. 469-475.

Kevern, J.T., V.R. Schaefer, K. Wang, M.T. Suleiman. 2008. Permeable concrete mixture proportions for improved freeze-thaw durability. *J. ASTM Int. (JAI)* 5, 1-12.

Kim, H. K. and H. K. Lee. 2010. “Acoustic Absorption Modeling of Porous Concrete Considering the Gradation and Shape of Aggregates and Void Ratio.” *Journal of Sound and Vibration* 329(7):866–79.

Kumar, K., J. Kozak, L. Hundal, A. Cox, H. Zhang, and T. Granato. 2016. “In-Situ Infiltration Performance of Different Permeable Pavements in a Employee Used Parking Lot e A Four-Year Study.” *Journal of Environmental Management* 167:8–14.

Lamb, G. S.. 2014. “Desenvolvimento e Análise Do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados Em Concreto Permeável.” *Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul* 1:150.

Larrard, F. de. 1999. *Concrete Mixture Proportioning - A Scientific Approach*. 2011th ed. Taylor & Francis e-Library.

Lee, B. J., G. G. Prabhu, B. C. Lee, and Y. Y. Kim. 2016. “Eco-Friendly Porous Concrete Using Bottom Ash Aggregate for Marine Ranch Application.” *Waste Management and Research* 34(3):214–24.

Lian, C., Y. Zhuge, and S. Beecham. 2011. “The Relationship between Porosity and Strength for Porous Concrete.” *Construction and Building Materials* 25(11):4294–98.

Marchioni, M., C.O. Silva. 2011. *Pavimento Intertravado Permeável – Melhores práticas*. Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), 24 p. São Paulo.

Martins, V. C. D. Avaliação de sistemas de prevenção e contenção de inundações em bacia de drenagem urbana. UFPA. Belém. PA. 2015. Disponível em <http://ppgec.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2015/vania.pdf>: s.n.

Mascaró, J.L. 2008. *Infra-estrutura da paisagem*. Porto Alegre: Masquatro.

Meddah, M. S., K. Al-Jabri, A. W. Hago, and A. S. Al-Hinai. 2017. “Effect of Granular Fraction Combinations on Pervious Concrete Performance.” *Materials Today: Proceedings* 4(9):9700–9704.

Neptune, A. I. and B. J. Putman. 2010. “Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures.” *ACI Material Journal*. Title no. 107-M71.

Neto, B. B. P., D. R. C. Oliveira, and D. Ramos. 2011. “Efeitos Do Tipo , Tamanho e Teor de Agregado Graúdo No Módulo de Deformação Do Concreto de Alta Resistência Effects of Type , Size and Content of Coarse Aggregates on the Modulus of Deformation of High Strength Concretes.” *Revista Matéria* 6(16):690–702.

Newman, P., T. Beatley, H. Boyer. 2009. *Resilient Cities: responding to peak oil and climate change*. Washington DC, Islando Press.

Ordre des architects. 2007. *Développement durable et architecture responsable – Engagements et retours d’expériences*. Editora CNOA.

Pansera, A. C., Henrique S. Pimenta, and L. T. Andrade. 2014. “Elaboração de Concreto Permeável Para Construção Civil.” 2–7.

Paz, A.R. 2004. *Hidrologia Aplicada*. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. Departamento de engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia. Caxias do Sul.

Peng, Z., K. Jinyan, P. Wenbin, Z. Xin, and C. Yuanbin. 2019. "Effects of Low-Impact Development on Urban Rainfall Runoff under Different Rainfall Characteristics." *Polish Journal of Environmental Studies* 28(2):771–83.

Pereira, L.O.M. 2013. O sistema de esgotamento sanitário no município de Belém. Ministério Público Federal.

Ponte, J. P. X. and A. J. D. N. Brandão. 2014. "Urbanistic Subsidies for a Metropolitan Drainage Plan, Belem, Brazil." *Lecture Notes in Engineering and Computer Science* 1:156–60.

Pontes, M. L. C., A. M. M. de Lima, J. A. Silva Júnior, and C. C. A. Sadeck. 2017. "Dinâmica Das Áreas de Várzea Do Município de Belém/PA e a Influência Da Precipitação Pluviométrica Na Formação de Pontos Alagamentos." *Caderno de Geografia* 27(49):285.

Portal do Saneamento Básico. 2019. Disponível em: <<https://www.saneamentobasico.com.br/saneamento-basico-brasil-graficos/>>. Acesso em: 22/11/2019.

Porto, R.L.L., K. Zahed Filho, R.M. Silva, 1999. Bacias hidrográficas. Escola politécnica da USP. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Hidrologia Aplicada.

Prefeitura Municipal de Belém. 2012. Anuário estatístico do Município de Belém. Disponível em: <<http://www.belem.pa.gov.br/>>. Acesso em: 31/10/2019.

Rocha, C.G., M.A. Sattler. 2017. Improving Acceptance of More Sustainable Technologies: Exploratory Study in Brazil. *J. Urban Plann*, 143.

Rodden, R., G. Voigt, and T. Smith. 2011. "Structural and Hydrological Design of Sustainable Pervious Concrete Pavements." *Annual Conference of the Transportation Association of Canada* 1–17.

Sadeck, L. W. R., A. A. A. Souza, and L. C. T. da Silva. 2012. "Mapeamento Das Zonas de Risco Às Inundações No Município de Belém.Pdf." VI Encontro Nacional Da Anppas 11.

Santos, C.M.S. 2017. O uso da drenagem como Método de Avaliação de Desempenho da Ocupação Urbana: Uma reflexão sobre a avenida Augusto Montenegro. Dissertação de Mestrado. Universidade federal do Pará. Belém.

Santos, F. A. A. and E. J. P. Rocha. 2015. “Alagamento e Inundação Em Áreas Urbanas. Estudo de Caso: Cidade de Belém.” *Revista Geoamazônia* 2(1):33–55.

Schaefer, V.R., M.T. Suleiman, K. Wang, J. T. Kevern, and P. Wiegand. 2006. “An Overview of Pervious Concrete Applications in Stormwater Management and Pavement Systems.” *Civil, Construction and Environmental Engineering*, Iowa State University, Ames, IA, 50011 1–10.

Secretaria Municipal de Planejamento e Desenvolvimento Sustentável. 2012. *Projeto Calçada Acessível – Guia para projetos de espaços públicos*. Seropédica – RJ.

Silva, A. S. M. 2004. “Dosagem De Concreto Pelos Métodos De Empacotamento Compressível E Aïtcin-Faury Modificado.” 124.

Silva, B.N.R. 1982. *Solos da área do programa grande Carajás*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido. 0101-2835.

Silva, I.A., F.M.P.C. Viana, R.S. Ferreira, R.F. Silva, E.C. Rodrigues, M.S. Pereira. *Avaliação do comportamento mecânico de concreto permeável com incorporação de sementes de açaí submetido à tração na flexão*. 2018. *Anais do 3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis*, 2018, Coimbra.

Silva, V. M. 2005. “Plano Diretor Setorial Do Sistema de Esgotamento Sanitário: Alternativas de Concepção Para a Área de Maior Adensamento Populacional Do Município de Belém-PA.” 199.

Silva, V.M. 2005. *Plano Diretor Setorial do sistema de esgotamento sanitário: alternativas de concepção para a área de maior adensamento populacional do município de Belém – PA*. UFPa. Belém, Pará.

Solminihac, H., Videla, C., Fernández, B., Castro, J. 2007. *Porous concrete mixtures for pervious urban pavements*. *Materiales de Construcción* 57, 287. Pág. 23 – 36.

Souza, R. O. R. De M., P. H. M. Scaramussa, M.A. C. M. Amaral, J. A. Pereira Neto, A. V. Pantoja, and L. W. R. Sadeck. 2012. “Equações de Chuvas Intensas Para o Estado Do Pará Intense Rainfall Equations for the State of Pará , Brazil.” (19):999–1005.

Souza, R. S. and R. F. Carvalho. 2016. Concreto Poroso de seixo rolado para pavimentos permeáveis moldado no local, s.l.: Trabalho Final de Graduação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.

Suleiman, M., J. Kevern, V. R. Schaefer, and K. Wang. 2006. “Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties.” *Concrete Technology Forum-Focus on Pervious Concrete*, National Ready Mix Concrete Association 1–8.

Sumanasooriya, M. S. and N. Neithalath. 2011. “Pore Structure Features of Pervious Concretes Proportioned for Desired Porosities and Their Performance Prediction.” *Cement and Concrete Composites* 33(8):778–87.

Sumanasooriya, M.S., O. Deo, and N. Neithalath. 2013. “Particle Packing-Based Material Design Methodology for Pervious Concretes.” (109).

Suzuki C.Y., A. M. Azevedo, F. A. Kabbach Júnior. 2013. *Drenagem subsuperficial de pavimentos – conceitos e dimensionamento*. São Paulo: oficina de textos.

Tennis, P. D., M. L. Leming, and D. J. Akers. 2004. *Pervious Concrete Pavements*.

Torres, A., J. Hu, and A. Ramos. 2015. “The Effect of the Cementitious Paste Thickness on the Performance of Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 95:850–59.

Trigo, A.P.M. 2012. *Estudo da dopagem de agregados para finalidade de uso em concretos estruturais*. Tese de doutorado em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo. São Carlos.

Tucci, C. E. M. 1990. “São Reservatórios.”

Tucci, C. E. M. 2002. “Gerenciamento Da Drenagem Urbana.” *Revista Brasileira de Recursos Hidricos* 7(1):5–27.

Valinski, N. A. and D. G. Chandler. 2015. “InFiLtration Performance of Engineered Surfaces Commonly Used for Distributed Stormwater Management.” *Journal of Environmental Management* 160:297–305.

Virgiliis, A. L. C. D. 2009. *Procedimento de Projeto e Execução de Pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheia*, s.l.: USP- Biblioteca Digital. São Paulo,

SP. Disponível em <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-08092010-122549/pt-br.php>. Acesso em 10/06/2018.

Walesh, S.G. 1989. *Urban Surface Water Management*. New York: John Wiley & sons, Inc. 518 p.

Xie, N., M. Akin, and X. Shi. 2019. “Permeable Concrete Pavements: A Review of Environmental Benefits and Durability.” *Journal of Cleaner Production* 210:1605–21.

Xu, G., W. Shen, X. Huo, Z. Yang, J. Wang, W. Zhang, and X. Ji. 2018. “Investigation on the Properties of Porous Concrete as Road Base Material.” *Construction and Building Materials* 158:141–48.

Yang, J. and G. Jiang. 2003. “Experimental Study on Properties of Pervious Concrete Pavement Materials.” *Cement and Concrete Research* 33(3):381–86.

Zhao, F. and Z. Ding. 2012. “Study of Pervious Concrete in Aggregate Gradation Structure.” *Advanced Materials Research*. Vol. 450-451, 439–444.

Zheng, M., S. Chen, and B. Wang. 2012. “Mix Design Method for Permeable Base of Porous Concrete.” *International Journal of Pavement Research and Technology*. 5(2):102–7.

Zhong, R. and K. Wille. 2015. “Material Design and Characterization of High Performance Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 98:51–60.

Zhong, R. and K. Wille. 2016. “Compression Response of Normal and High Strength Pervious Concrete.” *Construction and Building Materials* 109:177–87.

Zhong, R., Z. Leng, and C. Poon. 2018. “Research and Application of Pervious Concrete as a Sustainable Pavement Material: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review.” *Construction and Building Materials* 183:544–53.

## 7 ANEXOS

### ANEXO A – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

#### Caracterização preliminar dos agregados graúdos

Na Tabela A.1 apresenta-se a distribuição granulométrica do material. É possível notar que o diâmetro característico do material (D60), correspondente à faixa na qual até 60% dos grãos são retidos, é 4.8 mm. Ressalta-se que apesar do elevado percentual de grãos com diâmetro 9.5 mm, decidiu-se utilizar faixas inferiores para que fosse potencializada a resistência mecânica das amostras.

Tabela A.1 – Distribuição granulométrica do seixo de cava.

Peneira (mm)	Porcentagem retida	Porcentagem Retido Acumulado	Norma
50,00	0%	0%	ABNT, NBR NM 248 (2003)
38,00	0%	0%	
25,00	0%	0%	
19,00	2%	2%	
9,50	34%	35%	
4,80	27%	62%	
2,40	26%	87%	
1,20	6%	93%	
0,60	4%	97%	
0,30	2%	99%	
0,15	1%	99%	
0,075	0%	100%	
Fundo	0%	100%	

Fonte: o autor (2019).

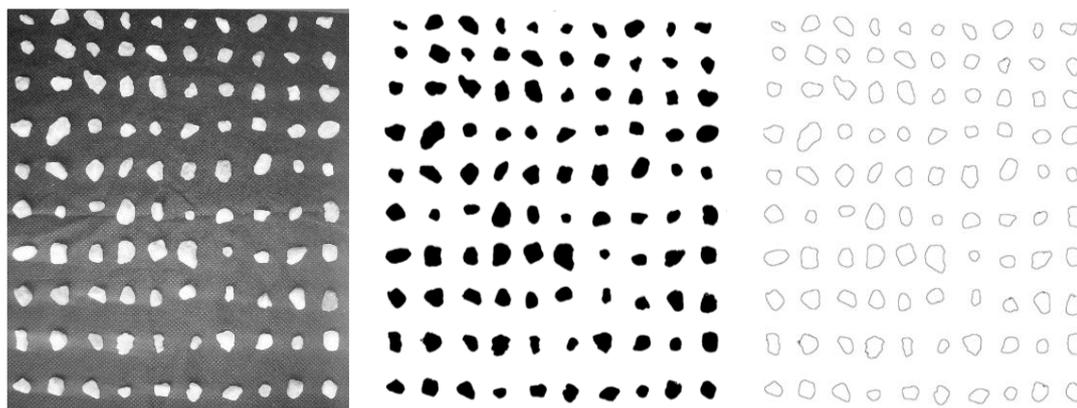
O agregado graúdo foi caracterizado também quanto à massa específica (NBR NM 53 (ABNT) 2009), massa unitária (NBR NM 45 (ABNT) 2006), percentual de vazios (NBR NM 45 (ABNT) 2006), taxa de absorção de água (NBR NM 53 (ABNT) 2009), ensaio de abrasão “Los Angeles” e grau de esfericidade (Figura A.1), através de técnica de Processamento Digital de Imagens (PDI) apresentado por Bessa et al. (2015).

Para cálculo do grau de esfericidade, foram agrupadas 100 amostras unitárias do agregado graúdo dominante, passante na peneira 3/8” e retido na peneira N° 4. A seguir, realizou-se registro fotográfico das amostras sobre fundo escuro e opaco, e definiu-se a esfericidade (r) conforme a equação 6, variando de 0 a 1.

$$r = \frac{4\pi A}{p^2} \quad (6)$$

Onde  $A$  é a área do grão e  $p$  é seu perímetro. Os resultados estão agrupados na Tabela A.2. A tabela reúne, ainda, as variáveis  $a$  e  $b$  definidas por (Larrard 1999), além da compacidade experimental de cada faixa granular analisada. Destaca-se a elevada esfericidade dos grãos, com  $r$  igual a 0.81.

Figura A.1 – Processo para definição de grau de esfericidade pelo método de PDI.



Fonte: o autor (2019).

Tabela A.2 - Caracterização do agregado graúdo.

Granulometria	m. esp.	Abs. água	m.u.	% vazios	a	b	Comp. exp.	Esfericidade
4.75			1566,89	40,43	-	-	59,57	0,81
2.38	2630,42	1%	1501,24	42,93	0,71	0,50	57,07	
1.19			1492,57	43,26	0,50	0,35	56,74	

Fonte: o autor (2019).

Observa-se, a partir da Tabela A.2, que a faixa 4.75 apresentou a maior massa unitária dentre as três faixas analisadas. Naturalmente, foi a faixa que apresentou o menor percentual de vazios e, conseqüentemente, a maior compacidade. A faixa 1.19, por outro lado, apresentou os maiores índices de porosidade entre as faixas deste estudo. Os coeficientes de afastamento e de ocorrência de efeito parede, por sua vez, foram calculados apenas para as faixas secundárias. O ensaio de abrasão “Los Angeles” apresentou como resultado 32.3%.

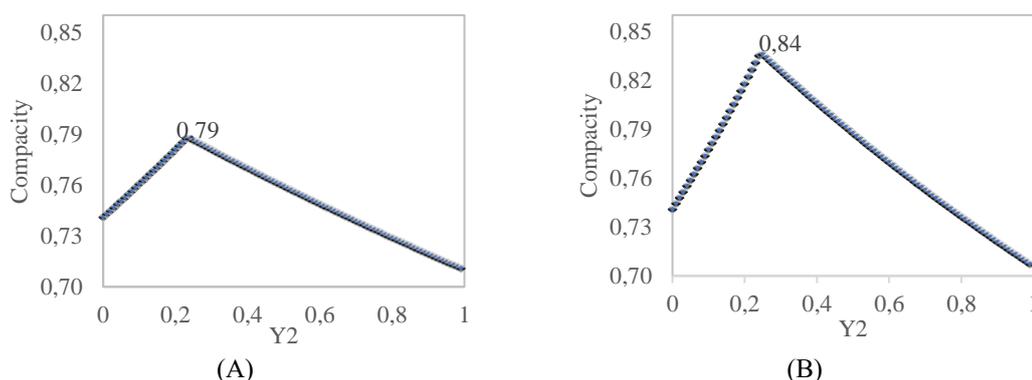
## Estudo do Empacotamento Virtual

Após a caracterização dos grãos, realizou-se estudo de compacidade virtual, com combinações binárias entre os grãos 3/8” e N° 4, e entre grãos N° 4 e N°8. Adotou-se, na simulação, K (referente ao adensamento) igual a 4.1. o que representaria um processo sem adensamento propriamente dito dos grãos, definido simplesmente como o lançamento destes.

A escolha desse processo “sem adensamento” é explicada pela opção de simplificação do processo, onde fossem definidos apenas os percentuais em massa referentes às faixas granulométricas que correspondessem à máxima compacidade de cada mistura binária. Desse modo, tendo posse de dados referentes às variáveis de interesse para o método de empacotamento compressível, foram realizadas simulações para estimativa de percentuais granulares em cada dupla de faixas em análise, conforme Figura A.2, de onde foram obtidos os valores que potencialmente conduziriam a amostras com maior compacidade.

Os valores obtidos, representados pelo percentual de cada faixa nas combinações feitas, sua massa unitária e percentual de vazios, estão agrupados na Tabela A.3, e estão em acordo com estudo desenvolvido por Zhao e Ding (2012), onde verificou-se que para misturas com percentual de grãos secundários entre 20 e 40%, é identificada a menor porosidade do esqueleto granular binário. Naturalmente, nas misturas que simularam interações com grãos menores, a máxima compacidade obtida fora superior à simulação de compacidade entre grãos de maior diâmetro característico, conforme já apontado por Zhao e Ding (2012).

Figura A.2 – A) Compacidade para distribuição granulométrica 4.75/9.6 mm e 2.38/4.75; B) Compacidade para distribuição granulométrica 4.75/9.6 mm e 1.19/2.38 mm.



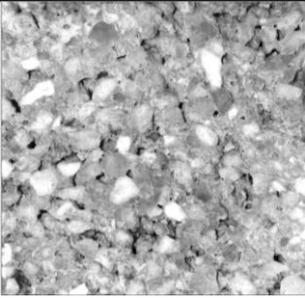
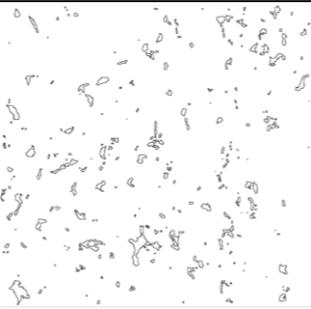
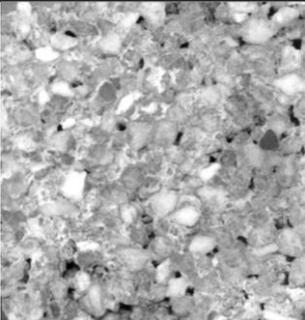
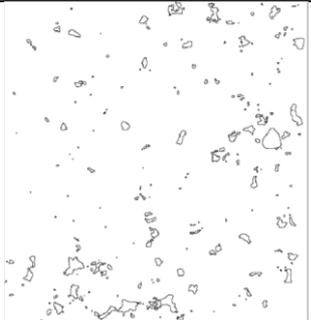
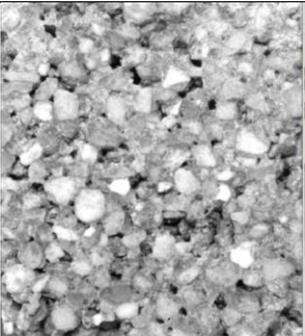
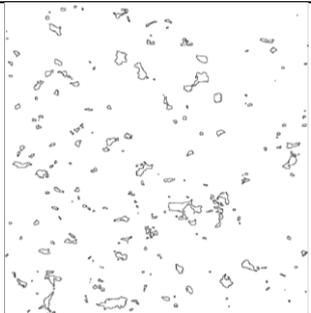
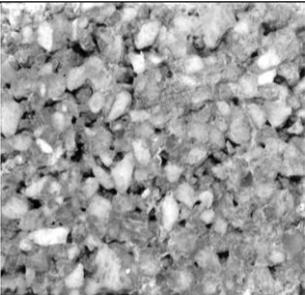
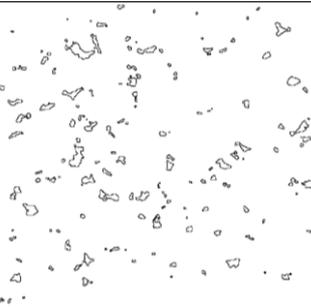
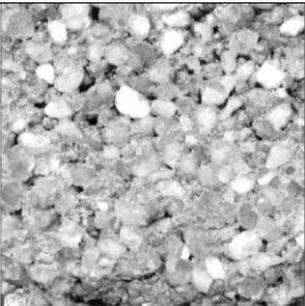
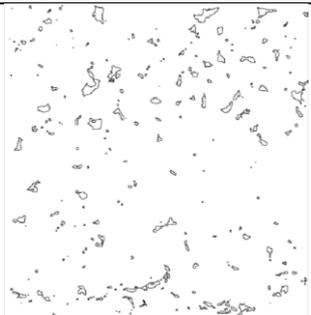
Fonte: o autor (2019).

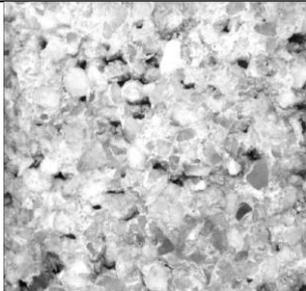
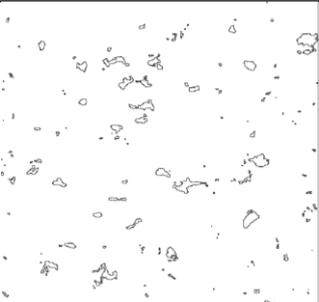
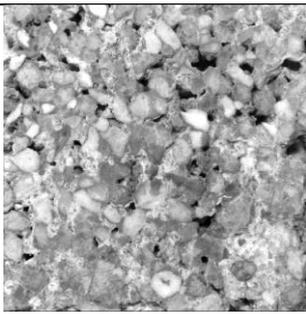
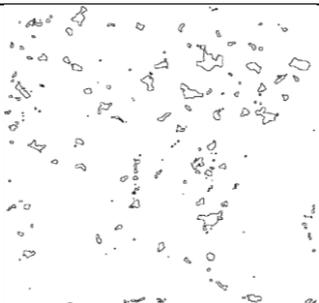
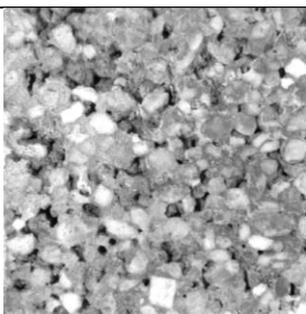
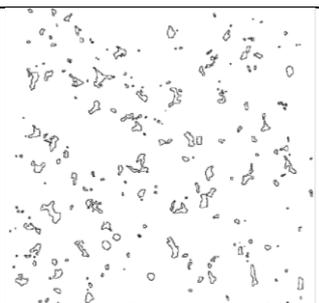
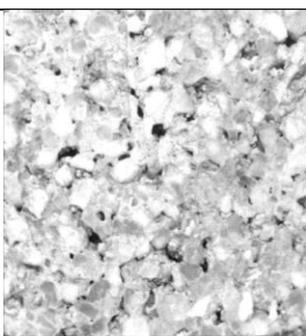
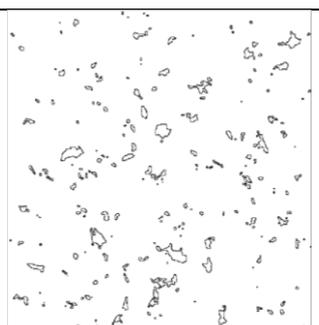
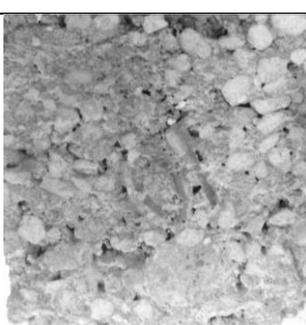
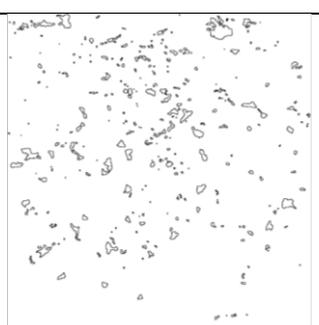
Tabela A.3 - Caracterização de combinações granulométricas.

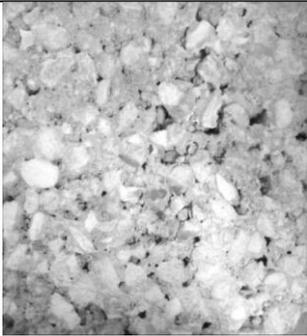
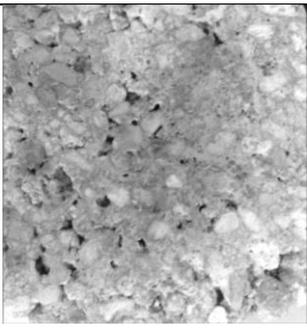
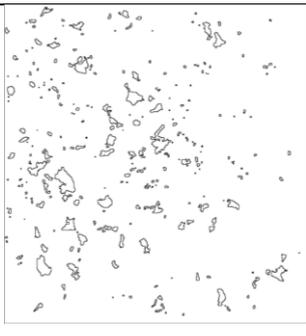
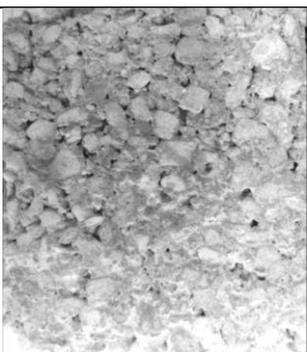
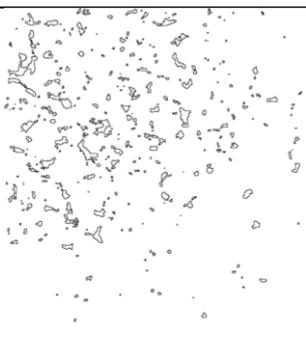
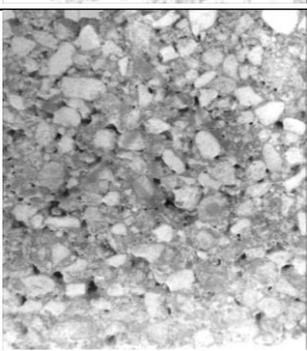
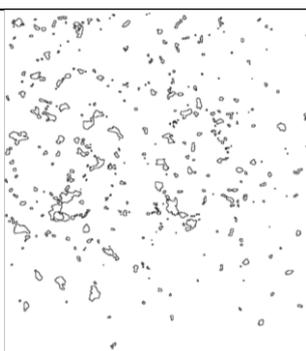
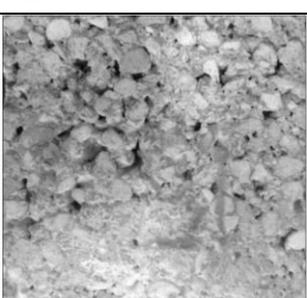
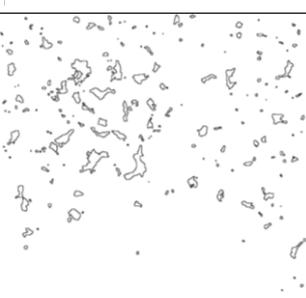
<b>Combinações</b>	<b>Granulometria</b>	<b>Proporção</b>	<b>m.u.</b>	<b>%Vazios</b>
M1	<b>4.75</b>	77%	<b>1569.7</b>	<b>40.93</b>
	<b>2.38</b>	23%		
M2	<b>4.75</b>	75%	<b>1688.6</b>	<b>36.45</b>
	<b>1.19</b>	25%		

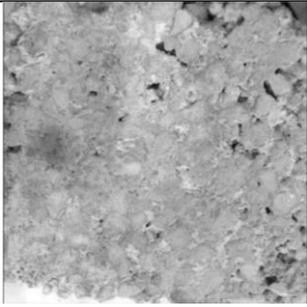
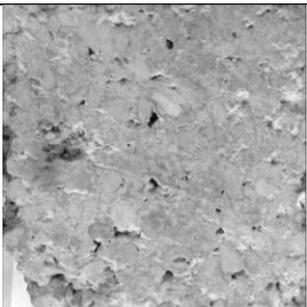
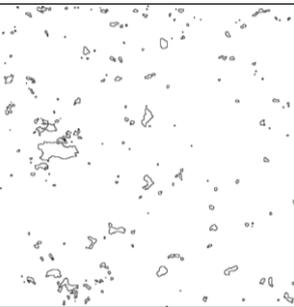
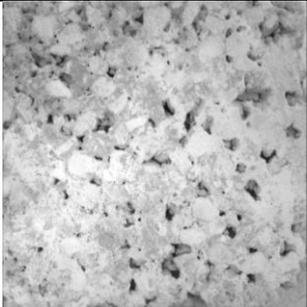
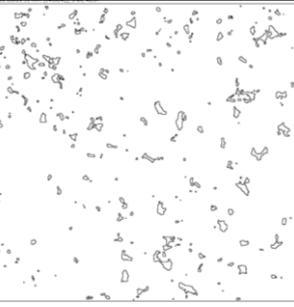
Fonte: o autor (2019).

**ANEXO B – REGISTROS DE PDI DE POROS INTERNOS**

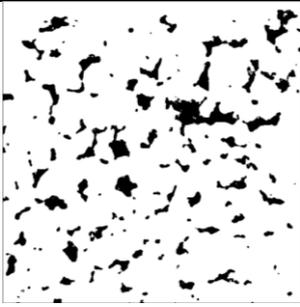
M1.1		
M1.2		
M1.3		
M1.4		
M1.5		

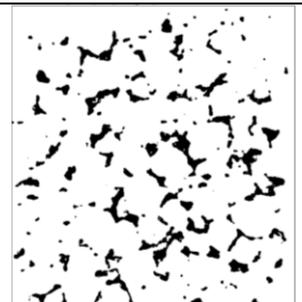
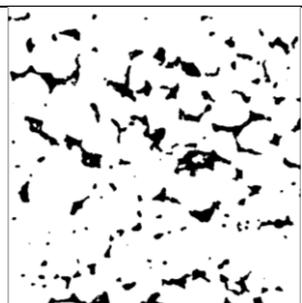
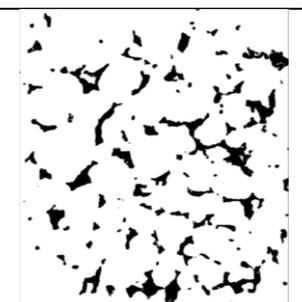
M1.6		
M1.7		
M1.8		
M1.9		
M2.1		

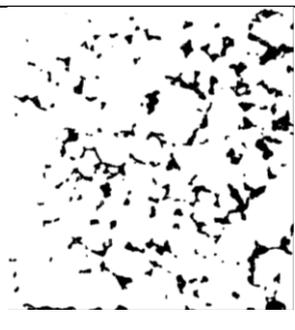
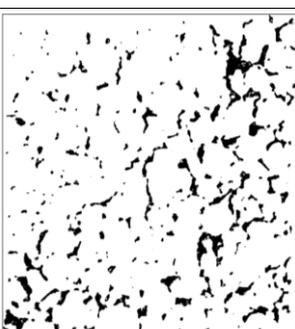
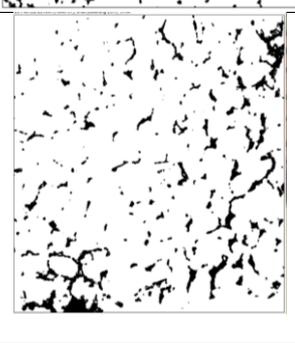
M2.2		
M2.3		
M2.4		
M2.5		
M2.6		

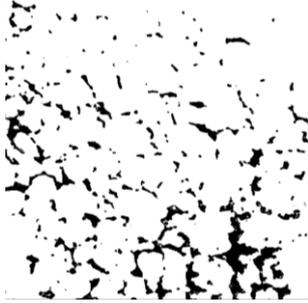
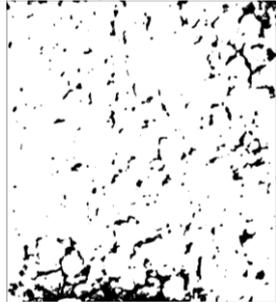
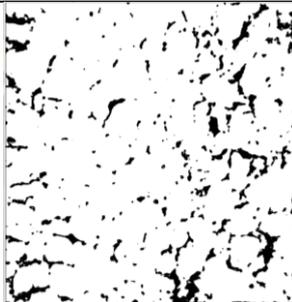
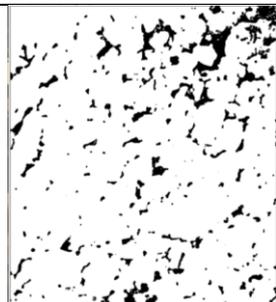
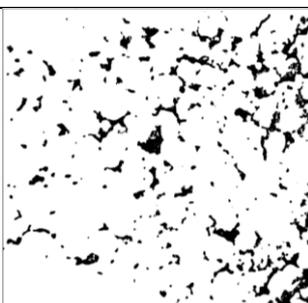
M2.7		
M2.8		
M2.9		

**ANEXO C - REGISTROS DE PDI DE POROS SUPERFICIAIS**

M1.1		
------	---	---

M1.2				
M1.3				
M1.4				
M1.5				
M1.6				

M1.7		
M1.8		
M1.9		
M2.1		
M2.2		

M2.3				
M2.4				
M2.5				
M2.6				
M2.7				

M2.8			
M2.9			