



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E  
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

MÍSLEY DA CRUZ TEIXEIRA

**ESTUDO DA COLMATAÇÃO EM CONCRETOS PERMEÁVEIS PARA TRÁFEGO LEVE E DE  
PEDESTRES**

Tucuruí - Pará

2020

MÍSLEY DA CRUZ TEIXEIRA

**ESTUDO DA COLMATAÇÃO EM CONCRETOS PERMEÁVEIS PARA TRÁFEGO  
LEVE E DE PEDESTRES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.

Área de concentração: Infraestrutura.

Orientadora: Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Tucuruí – PA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- T266e Teixeira, Mísley da Cruz.  
Estudo da colmatação em concretos permeáveis para tráfego leve e de pedestres / Mísley da Cruz Teixeira. — 2020.  
89 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2020.
1. Concreto permeável. 2. Colmatação. 3. Manutenção. I. Título.

---

CDD 625.84

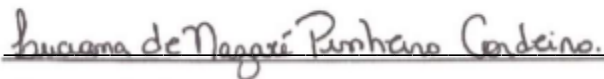
MÍSLEY DA CRUZ TEIXEIRA

**ESTUDO DA COLMATAÇÃO EM CONCRETOS PERMEÁVEIS PARA TRÁFEGO  
LEVE E DE PEDESTRES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético.  
Área de concentração: Infraestrutura.

Aprovada em 28 de maio de 2020.

BANCA EXAMINADORA:



---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

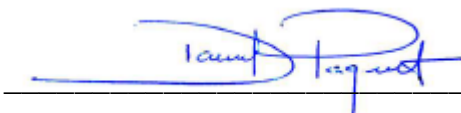
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – Orientadora



---

Prof. Dr. Paulo Sérgio Lima Souza

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - Examinador Interno



---

Prof. Dr. Daniel Tregnago Pagnussat

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - Examinador Externo

À minha mãe, pelo suporte e incentivo  
indescritíveis. Para você são e serão  
dedicadas todas as minhas conquistas.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e à Nossa Senhora de Nazaré pela força e confiança, que só a fé é capaz de proporcionar, para superar as dificuldades e concluir este trabalho.

Aos meus pais, Mixvane e Monteiro, pelo suporte e incentivo. Mãe, obrigada pela crença na minha capacidade, por todas as orações, pela paciência ao ouvir minhas reclamações e sabedoria ao me oferecer conselhos e soluções. Para vocês minhas palavras de gratidão nunca serão suficientes.

Aos meus familiares que auxiliaram neste percurso: Lucinda, Gilleno, Creuza, Mozaniel e Edilene, obrigada pela assistência física e psicológica prestada ao longo destes anos.

Aos amigos, vizinhos e quase parentes, Nely Maria e Cezar Furtado. Obrigada por todo o apoio espiritual e psicológico e por todo o incentivo.

Aos professores do programa pelos ensinamentos contributivos a minha formação acadêmica e profissional. Em especial, à Luciana Cordeiro pelo exemplo profissional e pela orientação com uma postura gentil e paciente (muito mesmo). De coração: Muito, muito obrigada professora!

Aos meus amigos desta trajetória: Mateus Mousinho, Taiana Ferreira, Felipe Mesquita e Brenda Maiara, pelo auxílio prestado na execução dos ensaios e por todos momentos compartilhados. De forma particular, agradeço ao Mateus Mousinho pelas inúmeras ações que se fossem descritas se estenderiam por várias páginas. Amigos, posso dizer que a jornada ficou mais leve e engraçada ao lado de vocês.

Às amigas de longa data, Marlla Mendes e Vanêssa Leal, por me emprestarem seus ouvidos: eu sei que vocês cansaram de me ouvir falar em concreto permeável e dissertação.

À Fran, por acompanhar e auxiliar todas as atividades do programa experimental. Sua disponibilidade e ajuda foram essenciais.

E por fim, à UFPA, através do PPGINDE/NDAE, pela possibilidade desta formação acadêmica.

## RESUMO

O concreto permeável é um material usado principalmente como revestimento de pavimentação para a minimização dos efeitos da impermeabilização superficial. Porém, a suscetibilidade deste material à colmatação (processo de entupimento dos poros) é um dos fatores limitantes à sua utilização. Por isso, a colmatação passou a ser objeto de estudo de várias pesquisas, como esta que avaliou o efeito deste processo em concretos permeáveis a serem usados como revestimento de pavimentação de tráfego leve e de pedestres. Para tanto, um programa experimental foi elaborado com o objetivo de caracterizar o material, produzido com inserção de diferentes percentuais de agregado miúdo, e avaliar a evolução da colmatação causada por tipos diferentes de sedimentos (areia e argila). Os espécimes moldados foram submetidos a ensaios de caracterização e de permeabilidade, após ciclos de deposição de sedimentos e de limpeza por aspiração. Os resultados da caracterização do material no estado fresco corroboraram a afirmação comum na comunidade acadêmica de que a inserção de agregado miúdo nas composições granulométricas aumenta a massa unitária e a resistência mecânica e reduz o percentual de vazios e a permeabilidade do concreto. Quanto à evolução da colmatação observou-se que os sedimentos de granulometria maior (areia) provocaram a perda de permeabilidade com o tamponamento da camada superior das amostras, com taxas de perda de até 21,13% após os ciclos de deposição. Já os sedimentos mais finos (argila) provocaram a colmatação das camadas inferiores, com um percentual final de redução da permeabilidade variando entre 8,45 e 16,46%. A eficiência da manutenção foi comprovada com a recuperação total da permeabilidade para colmatação por areia, e de 96,85% para a sedimentação com argila. Estes resultados permitem afirmar que sedimentos de qualquer granulometria promovem a perda de permeabilidade do material, mas que esta é facilmente recuperável com a manutenção/limpeza do pavimento, o que permite confirmar que a vida útil do pavimento, no que tange à sua capacidade drenante, está diretamente associada à limpeza periódica do mesmo.

Palavras-chave: Concreto permeável. Colmatação. Permeabilidade. Manutenção.

## ABSTRACT

Permeable concrete is a material mostly used as paving coating to reduce the effects of surface sealing. The material's susceptibility to clogging is considered as a disadvantage, and it became an object of study in research about this material, as this one which evaluated the effect of clogging on permeable concretes used as pavement coating to light traffic. To this end, an experimental program was elaborated to characterize the material, designed with different percentages of fine aggregate, and to evaluate the evolution of clogging in permeable. The specimens were submitted to characterization and permeability tests after deposition cycles of different types of sediments (sand and clay) and cleaning by aspiration. The results of fresh material characterization corroborated the common assertion in the academic community that the insertion of fine aggregate in mix compositions increases the unit mass and the mechanical strengths and reduces the void percentage and the permeability of the concretes. The clogging tests proved that larger particle size sediments (sand) caused a loss of permeability due to sealing of the upper layer of the specimen, with loss ratios up to 21,13% at the end of the 20th sedimentation cycle, while the smaller particle size sediments (clay) induce to a deeper clogging, with a permeability reduction varying of 8,45% to 16,46%. The maintenance efficiency was proven by total recovery of clogging by sand, and a recovery percentage of 96,85% to clogging by clay. These results make it possible to declare that any particle size can clog the material, but also it is easy to recover its permeability by maintaining/cleaning of the pavement, which confirms that the pavement lifespan and raining capacity are directly associated to its periodic cleaning.

Keywords: Pervious concrete. Clogging. Permeability. Maintenance.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Quantitativo anual de artigos publicados sobre concreto permeável. ...	23
Figura 2.2 – Quantitativo de trabalhos publicados sobre concreto permeável em diversos países. ....	24
Figura 2.3 – Representação da estrutura porosa do concreto permeável. ....	26
Figura 2.4 – Textura visual do concreto permeável. ....	28
Figura 2.5 – Esquematização da tortuosidade. ....	31
Figura 2.6 – Ensaio de coesão de um concreto permeável com (a) baixa relação a/c, (b) relação a/c adequada e (c) relação a/c alta. ....	36
Figura 2.7 – Cura com (a) a aspersão de água e (b) cobertura da superfície livre com material plástico. ....	38
Figura 2.8 – Esquematização do processo de colmatação pela deposição de sedimentos. ....	40
Figura 3.1 – Etapas do programa experimental. ....	47
Figura 3.2 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural. ....	51
Figura 3.3 – Curva granulométrica do solo empregado. ....	52
Figura 3.4 – Permeâmetro de carga variável utilizado. ....	59
Figura 3.5 – Fluxograma do ensaio de colmatação sem aplicação da limpeza. ....	60
Figura 3.6 – Fluxograma do ensaio de colmatação com aplicação da limpeza. ....	60
Figura 4.1 – Análise tátil-visual da consistência. ....	62
Figura 4.2 – Massa específicas ( $\rho$ ) e índice de vazios ( $I_v$ ) dos concretos no estado fresco. ....	63
Figura 4.3 – Massas específicas ( $\rho$ ) e índices de vazios ( $I_v$ ) dos concretos no estado endurecido. ....	64
Figura 4.4 – Resistências à tração na flexão, em MPa, dos concretos produzidos. .	65
Figura 4.5 – Coeficiente de permeabilidade de cada grupo. ....	66
Figura 4.6 – Relação entre os índices de vazios e as permeabilidades obtidos. ....	67
Figura 4.7 – Evolução da permeabilidade em função da colmatação por areia. ....	69
Figura 4.8 – Colmatação dos corpos-de-prova por areia. ....	70
Figura 4.9 – Evolução da permeabilidade em função da colmatação por argila. ....	70
Figura 4.10 – Colmatação dos corpos-de-prova por argila. ....	71
Figura 4.11 –Evolução da permeabilidade mediante a colmatação por areia e limpeza. ....	72

Figura 4.12 – Evolução da permeabilidade em função da colmatação por argila e limpeza. ....73

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Dosagens de concretos permeáveis apresentadas na literatura.....	36
Quadro 3.1 – Matriz experimental da pesquisa. ....	44
Quadro 3.2 – Quantitativo de corpos de prova produzidos.....	46
Quadro 3.3 – Especificações técnicas do cimento utilizado. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades de concretos permeáveis apresentadas na literatura científica.....	25
Tabela 3.1 – Composição granulométrica e características físicas do agregado graúdo (brita 0). .....	49
Tabela 3.2 – Composição granulométrica e características físicas do agregado miúdo natural.....	50
Tabela 3.3 – Características do solo empregado na colmatação. ....	52
Tabela 3.4 – Caracterização das combinações granulométricas.....	54
Tabela 3.5 – Dosagem calculada para cada composição. ....	56
Tabela 4.1 – Permeabilidade, em mm/s, antes e após o processo de colmatação...	68
Tabela 4.2 – Permeabilidade, em mm/s, antes e após os ciclos de colmatação e limpeza. ....	72

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CP-II	Cimento Portland composto
CP-II-E	Cimento Portland composto com adição de escória de alto-forno
CP-III	Cimento Portland de alto forno
CP-IV	Cimento Portland pozolânico
EE	Estado endurecido
EUA	Estados Unidos da América
FC	Fator de compactação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Plasticidade
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
ONU	Organização das Nações Unidas
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
PF	Perda ao Fogo
PMB	Perfil dos Municípios Brasileiros
RI	Resíduo Insolúvel
WWI	<i>World Resources Institute</i>
WWR	<i>World Resources Report</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Percentual
kg/m <sup>3</sup>	Quilograma por metro cúbico
mm/s	Mílimetro por segundo
MPa	MegaPascal
V	Volume
V <sub>v</sub>	Volume total de vazios
V <sub>agg</sub>	Volume do agregado
V <sub>p</sub>	Volume de pasta
V <sub>va</sub>	Volume de vazios/poros acessíveis
V <sub>vna</sub>	Volume de vazios/poros não acessíveis
V <sub>vnc</sub>	Volume de vazios/poros não conectados
V <sub>vp</sub>	Volume de vazios/poros da pasta
a/c	Relação água/cimento
mm	Milímetro
cm	Centímetro
MgO	Óxido de magnésio
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre
µm	Micrômetro
cm <sup>2</sup> /g	centímetro quadrado por grama
min	Minuto
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
kN/m <sup>3</sup>	Kilonewton por metro cúbico
C <sub>c</sub>	Consumo de cimento
FC	Fator de compactação
V <sub>vc</sub>	Volume de vazios/poros conectados
ρ <sub>c</sub>	Massa específica do cimento
% <sub>ad</sub>	Percentual de aditivo
ρ <sub>ad</sub>	Massa específica do aditivo
m	Proporção entre a quantidade de agregado e de cimento
ρ <sub>m</sub>	Massa específica da composição
ρ <sub>w</sub>	Massa específica da água
L	Litros

h	Hora
±	Mais ou menos
$\rho$	Massa específica
$m_c$	Massa de cimento
$m_r$	Massa do recipiente
$V_r$	Volume do recipiente
Iv	Índice de vazios
$\rho_t$	Massa específica teórica
$m_s$	Massa do corpo de prova seco
$m_{sub}$	Massa do corpo de prova submerso
k	Coefficiente de permeabilidade
$A_t$	Área da seção do tubo
l	Comprimento da amostra
A	Área da amostra
t	Tempo
$h_i$	Altura inicial da coluna d'água
$h_f$	Altura final da coluna d'água
mm <sup>2</sup>	Milímetro quadrado
s	Segundo
g	Grama
R <sup>2</sup>	Coefficiente de correlação

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo Geral .....	19
1.2.2 Objetivos Específicos .....	20
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
<b>2 CONCRETO PERMEÁVEL .....</b>	<b>21</b>
2.1 DEFINIÇÃO, USOS E BENEFÍCIOS.....	21
2.2 HISTÓRICO .....	22
2.3 CARACTERIZAÇÃO .....	24
2.3.1 Características Físicas .....	26
2.3.2 Características Mecânicas .....	28
2.3.3 Características Hidráulicas.....	30
2.4 MATERIAIS.....	32
2.4.1 Agregados.....	32
2.4.2 Aglomerantes .....	33
2.4.3 Aditivos e Adições .....	34
2.5 DOSAGEM.....	34
2.5.1 Métodos de Dosagem .....	35
2.5.2 Relação Água/Cimento .....	36
2.5.3 Relação Agregado/Pasta .....	37
2.6 PRODUÇÃO .....	37
2.6.1 Mistura e Concretagem .....	37
2.6.2 Cura .....	38
2.7 MANUTENÇÃO.....	38
2.8 COLMATAÇÃO .....	39
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>43</b>
3.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA .....	43
3.1.1 Variáveis de Resposta .....	43
3.1.2 Fatores Controláveis .....	43



3.1.3 Matriz Experimental.....	44
3.1.4 Etapas do Programa Experimental.....	46
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	47
3.2.1 Aglomerante.....	47
3.2.2 Agregado Graúdo.....	48
3.2.3 Agregado Miúdo.....	49
3.2.4 Sedimentos .....	51
3.2.5 Água .....	52
3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	53
3.3.1 Estudo de Dosagem.....	53
3.3.1.1 Seleção das composições granulométricas.....	53
3.3.1.2 Dosagem experimental.....	54
3.3.2 Produção dos corpos de prova.....	56
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO.....	57
3.4.1 Caracterização do Concreto no Estado Fresco .....	57
3.4.2 Caracterização do Concreto no Estado Endurecido .....	58
3.5 ANÁLISE DA COLMATAÇÃO .....	59
<b>4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO .....	62
4.1.1 Consistência .....	62
4.1.2 Massa Específica e Índice de Vazios .....	62
4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO .....	64
4.2.1 Massa Específica e Índice de Vazios .....	64
4.2.2 Resistência à Tração na Flexão .....	65
4.2.3 Permeabilidade .....	66
4.3 EVOLUÇÃO DA COLMATAÇÃO .....	68
4.3.1 Efeito da Colmatação sem a Limpeza do Material.....	68
4.3.2 Efeito da Colmatação com a Limpeza do Material.....	71
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>74</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	74
5.1.1 Quanto à Inserção do Agregado Miúdo.....	74
5.1.2 Quanto à Tipologia do Sedimento na Colmatação do Concreto .....	74

5.1.3 Quanto à Manutenção do Material e a Recuperação da Permeabilidade .....	75
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO A – MASSAS ESPECÍFICAS E ÍNDICES DE VAZIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXO B – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO C – COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE .....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXO D – COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE APÓS SEDIMENTAÇÃO ...</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

As inundações em áreas urbanas são um dos fenômenos que impactam a sociedade, trazendo prejuízos ao meio ambiente (natural e construído) e à qualidade de vida da população (TUCCI, 2003).

Estas podem ser condicionadas por fatores naturais, como o regime pluviométrico e a capacidade de infiltração do solo locais, e agravadas por fatores antrópicos, como a urbanização (TUCCI, 1999 *apud* SANTOS, 2012).

O crescimento populacional e o êxodo rural ocorrido no século passado geraram uma explosão demográfica urbana notável em escala mundial e nacional. A Organização das Nações Unidas (ONU), através do seu relatório *Perspectivas da Urbanização Mundial*, apontou que a população mundial urbana cresceu de 751 milhões para 4,2 bilhões de pessoas entre 1950 e 2018 (UNITED NATIONS, 2018). No Brasil, dados do Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) mostraram que o aumento populacional urbano foi de 18 milhões para 160 milhões entre 1950 e 2010 (IBGE, 2018a).

A intensa urbanização promoveu a ocupação desordenada do solo, levando ao aumento da demanda por habitação e infraestrutura. Segundo o Relatório de Recursos Mundiais (*World Resources Report, WRR*), do *World Resources Institute* (WRI), em 2017 o déficit habitacional mundial era de 330 milhões de unidades afetando a 1,2 bilhão de pessoas (WRI, 2020).

A necessidade por infraestrutura básica foi suprida principalmente com construções e pavimentação de vias. Estas atividades tiveram vários efeitos sobre o meio ambiente como a redução da cobertura vegetal e a impermeabilização de superfícies que alteraram o regime de escoamento pluvial (PINTO, 2011; BATEZINI, 2013; LAMB, 2014; BECHARA, 2017).

Alencar (2013) considera que a impermeabilização dos solos urbanos impacta o escoamento pluvial de duas maneiras. A primeira é através da redução da vida útil dos sistemas de drenagem, pois o aumento da velocidade e do volume de escoamento superficial permite o transporte de um volume maior de sólidos em suspensão que, a

longo prazo, sedimentam no interior das tubulações reduzindo a seção de escoamento. E a segunda é pela diminuição do volume de recarga dos aquíferos, uma vez que a área e o tempo de contato para infiltração são menores.

Para corroborar a correlação a urbanização e a ocorrência de alagamentos, dados do Perfil dos Municípios Brasileiros (PMB) de 2013 indicaram que 1543 dos 5570 municípios do país sofreram com enchentes ou inundações graduais em áreas urbanas entre os anos de 2008 e 2012, o que representa um percentual de 27,7% de municípios afetados (IBGE, 2018b).

No estado do Pará este percentual se eleva para 32,6%, com 47 dos 144 municípios atingidos (IBGE, 2018b). Um destes é Tucuruí, município localizado na região sudeste do estado e com grau de urbanização de aproximadamente 95% com um total de 92.442 habitantes na área urbana (IBGE, 2019).

A pluviosidade local associada ao relevo naturalmente acidentado e impermeabilizado pela ocupação urbana, gera um grande e veloz volume de escoamento superficial, que somado às enchentes naturais do rio Tocantins, sobrecarrega a rede de drenagem implantada e resulta nos alagamentos comuns ao município.

A recorrência e intensificação das inundações urbanas levantou a discussão sobre a eficácia dos sistemas tradicionais de drenagem pluvial, que se baseiam na canalização e rápida condução para jusante, e resultou no desenvolvimento de tecnologias alternativas de drenagem, que reduzissem o volume pluvial a ser drenado ou ampliassem a capacidade de armazenamento dos sistemas e de infiltração do solo. Tucci (2005) e Alencar (2013) citam como exemplo, a implantação de telhados verdes, a construção de elementos de infiltração (valas, poços), o aproveitamento pluvial para fins não-potáveis e a pavimentação permeável.

Esta última, é um tipo de pavimentação especial que permite a percolação e o armazenamento temporário das águas pluviais nas vias, diminuindo o escoamento superficial e liberando lenta e gradativamente o volume pluvial para o sistema tradicional ou permitindo a sua infiltração no solo (BECHARA, 2017).

Diferentes materiais podem ser empregados na pavimentação permeável, como placas e blocos (vazados ou inteiriços) de concreto, o asfalto poroso, e o concreto permeável.

Sobre este último, as pesquisas iniciais estudaram a influência dos parâmetros de composição e produção sobre suas propriedades. Como por exemplo, Yang e Jiang (2003), que analisaram os efeitos da variação do tamanho dos agregados e da incorporação de sílica e superplastificantes, e Suleiman *et al.* (2006), que analisaram a influência da energia de compactação.

As pesquisas mais recentes abordam principalmente a melhoria das propriedades e do processamento do material e os efeitos da incorporação de novos componentes, como a de Nyguen *et al.* (2014) que desenvolveram um método de dosagem baseado na quantificação da camada de pasta; e Giustozzi (2016), que criou um concreto permeável modificado por adição de polímeros.

Mesmo com a ampliação do número de publicações sobre o tema, saindo da de 21 para 106 entre 2010 e 2018, conforme dados levantados na plataforma *Web of Science*, ainda existem lacunas de pesquisas a serem preenchidas. Chandrappa e Biligiri (2016) apontam algumas perspectivas de pesquisa, como: especificações de dosagem e de métodos de ensaios para determinação das propriedades; correlações entre os resultados laboratoriais e de campo; manutenção e performance a longo prazo; e modelagem estrutural.

Dentro da linha de pesquisa sobre manutenção e performance a longo prazo do concreto permeável, tem-se o estudo da colmatação (processo de entupimento dos poros que afeta diretamente a capacidade drenante do material reduzindo a sua vida útil), que é o foco deste trabalho. Especificamente pretende-se analisar a influência da tipologia dos sedimentos e da limpeza do material sobre a capacidade drenante do mesmo para assim correlacionar a colmatação e o desempenho hidráulico do material.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar o efeito da tipologia do sedimento e da manutenção do material na evolução da colmatação em concretos permeáveis a serem usados como revestimento de pavimentação de tráfego leve e de pedestre.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Com base nas atividades executadas no decorrer da pesquisa, os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) avaliar a influência da inserção de agregado miúdo na porosidade, resistência mecânica e permeabilidade do concreto;
- b) analisar o efeito do tipo de sedimento no modo de colmatação do concreto;
- c) avaliar a influência da limpeza na recuperação da capacidade drenante do material;
- d) correlacionar a colmatação com a performance hidráulica do concreto a longo prazo;
- e) correlacionar a eficácia da limpeza na manutenção da vida útil do material.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, como apresentado a seguir:

O capítulo inicial é uma introdução que apresenta a contextualização que motiva e justifica a realização da pesquisa, os objetivos estabelecidos e a estrutura do trabalho.

O capítulo seguinte trata de uma revisão da literatura científica. Nele são apresentadas informações sobre o concreto permeável consideradas relevantes ao estudo.

O terceiro capítulo mostra a metodologia da pesquisa, incluindo a especificação dos materiais utilizados, as variáveis consideradas e a descrição do programa experimental executado.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos e as discussões referentes a estes.

No capítulo final tem-se as considerações finais da pesquisa, com as conclusões gerais do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 CONCRETO PERMEÁVEL

### 2.1 DEFINIÇÃO, USOS E BENEFÍCIOS

Para o *American Concrete Institute* (ACI), o concreto permeável é um concreto especial cuja principal característica é a presença de vazios interconectados que permitem a percolação da água por ação da gravidade (ACI, 2010). Esta mesma definição é apresentada pela Norma Brasileira (NBR) 16416 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que trata dos pavimentos permeáveis de concreto (ABNT, 2015).

Tecnicamente, o concreto permeável é um material formado a partir da mistura de cimento, agregado graúdo (normalmente de granulometria uniforme ou descontínua), água, aditivos, e pouca ou nenhuma quantidade de agregado miúdo ou finos. Esta mistura resulta em um material composto basicamente pelo agregado graúdo recoberto por uma camada de pasta de cimento (ACI, 2010).

O uso principal do concreto permeável é como material de revestimento de pavimentação permeável, mas ele pode ser utilizado na vedação de edificações, estabilização de taludes, fabricação de elementos de drenagem, entre outros.

Segundo Hölitz (2011), os principais benefícios da utilização do concreto permeável como revestimento de pavimentação, que levaram à sua qualificação como material sustentável pelo conselho de certificação em *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), são:

- a) melhoria da eficiência da drenagem urbana, com a redução dos custos de implantação dos sistemas de drenagem e melhor utilização da área do solo;
- b) melhoria das condições ambientais, com a amenização dos efeitos das ilhas de calor e da intensidade de ruído das vias;
- c) fomento à economia local, pela possibilidade de incorporação e transporte de insumos locais;
- d) sustentabilidade, pela redução do consumo de recursos naturais e dos efeitos da impermeabilização no ciclo hidrológico e pela reciclabilidade.

Tong (2011) ainda apresenta outros benefícios como: melhoria da qualidade da água da chuva, devido a filtragem de poluentes; aumento da segurança das condições das vias, pelo maior atrito que reduz os efeitos de aquaplanagem e do acúmulo de gelo; manutenção da vegetação local, uma vez que as raízes das plantas têm acesso à água; e economia de energia pela redução dos efeitos das ilhas de calor.

Apesar dos diversos benefícios, a aplicação do concreto permeável na pavimentação tem sido limitada ao tráfego leve e de pedestres devido a sua baixa resistência mecânica e aos ciclos de gelo-degelo, se comparadas às do concreto convencional, e sua sensibilidade aos efeitos da colmatção, que aumentam os custos de manutenção e limpeza.

## 2.2 HISTÓRICO

O concreto permeável é considerado um tipo de concreto poroso, sendo o seu diferencial a interconectividade entre os poros. Logo sua história é contada a partir do desenvolvimento e uso do concreto poroso seguindo até o seu avanço e denominação como concreto permeável.

Segundo Francis (1965 *apud* ACI, 2010), o concreto poroso é usado desde a segunda metade do século XIX. O primeiro registro é de 1852, onde este concreto foi utilizado na construção de duas residências no Reino Unido. O próximo apontamento é do ano de 1923 onde casas foram construídas em Edimburgo, na Escócia.

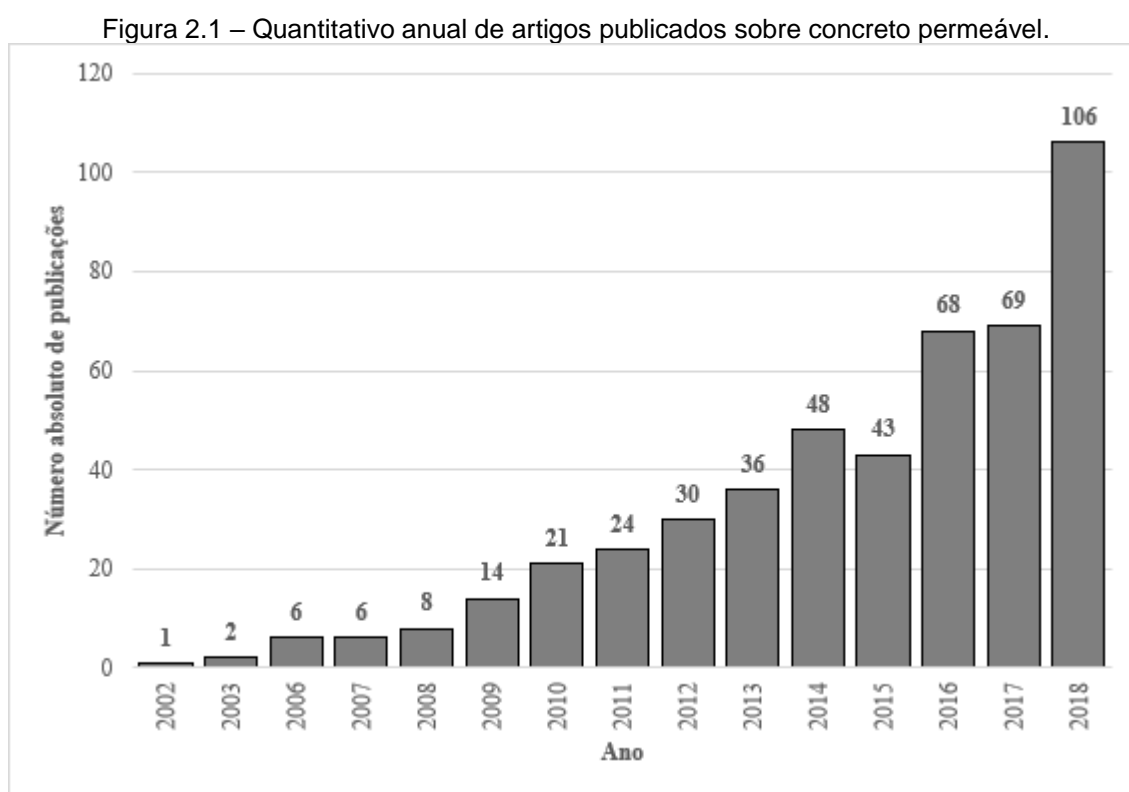
Depois da Segunda Guerra Mundial (1939-1945), o uso do concreto poroso se ampliou, principalmente na Europa, devido à grande demanda habitacional, uma das consequências da guerra, e ao seu baixo custo, oriundo do menor consumo de cimento em comparação com o convencional (MALTHORA, 1969 *apud* ACI, 2010). Outro fator que auxiliou a adoção do concreto poroso como material de construção foi a incapacidade da indústria de suprir a demanda por blocos, uma vez que o continente sofria com a escassez de insumos.

Na América, o concreto poroso passou a ser adotado somente a partir da década de 1970, quando o Estados Unidos da América (EUA) passou a sofrer com os problemas de drenagem e poluição hídrica decorrentes da urbanização e o adotou como material de pavimentação (LAMB, 2014).



A partir de então, este passou também a ser chamado de concreto permeável e o seu estudo e aprimoramento estiveram associados principalmente à pavimentação permeável. Quando esta foi reconhecida como uma prática sustentável de gestão de águas pluviais e foi difundida nos países mais desenvolvidos, as pesquisas sobre este material se ampliaram.

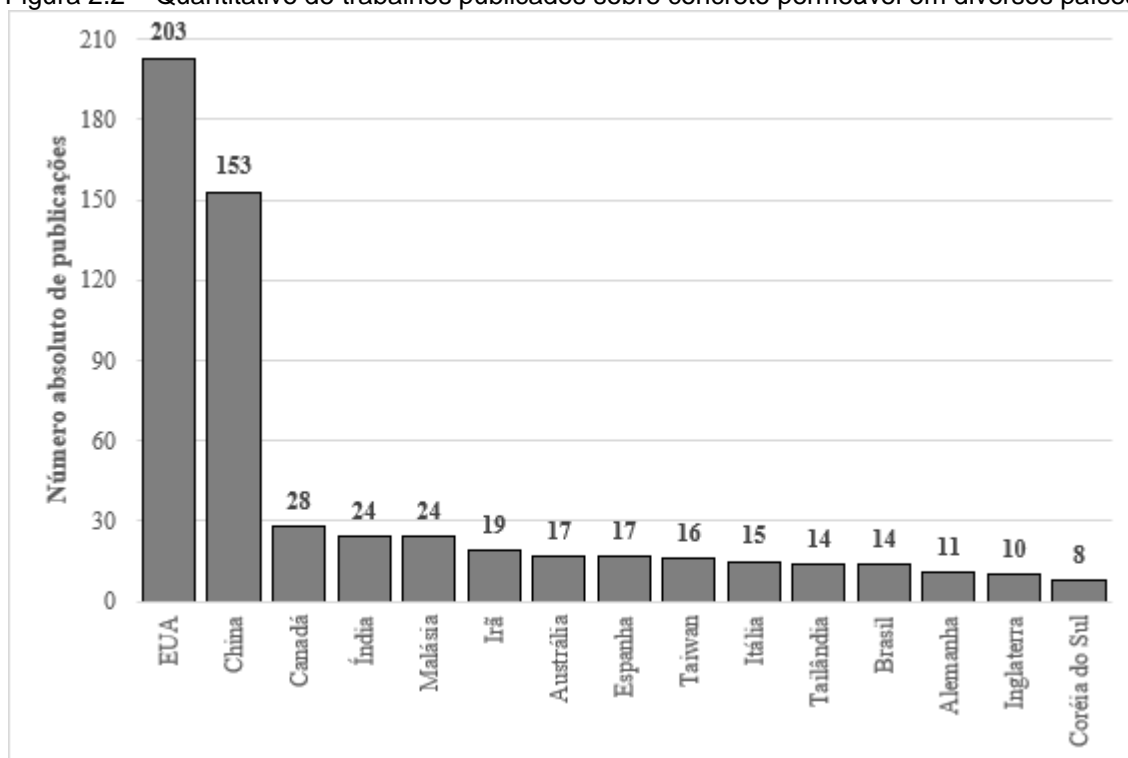
Com base no levantamento da quantidade de artigos científicos publicados em cada ano, apresentado na Figura 2.1 a seguir, é possível perceber o crescimento das pesquisas sobre concreto permeável.



Fonte: Elaboração própria com base nos dados coletados na plataforma *Web of Science*.

Quanto ao local de origem das pesquisas, o EUA e China apresentam os maiores volumes de publicações, como é possível observar nos dados da Figura 2.2 na página a seguir. O destaque aos estadunidenses decorre do grande volume de estudos sobre a resistência ao gelo-degelo.

Figura 2.2 – Quantitativo de trabalhos publicados sobre concreto permeável em diversos países.



Fonte: Elaboração própria com base nos dados coletados na plataforma *Web of Science*.

O baixo volume de publicações no país pode ser associado à falta de conhecimento sobre a pavimentação permeável, e sobre o próprio material em si, dentre os profissionais da construção civil. Sobre este material, ainda existem muitas lacunas que podem ser estudadas e resultarem em material para o embasamento de normatizações e padronizações que facilitarão mais o estudo deste material.

### 2.3 CARACTERIZAÇÃO

A primeira ideia que se tem quando se fala em concreto permeável é a elevada capacidade drenante, ou seja, a alta permeabilidade do material. Esta propriedade, assim como diversas outras, é associada à porosidade do material, propriedade que retrata o volume de vazios do material.

Por sua vez, a porosidade é influenciada por diversos fatores oriundos da composição e do método de produção do concreto. A dependência da porosidade para com as diversas variáveis e das demais propriedades em relação à porosidade

é visível na variabilidade de valores obtidos pelas pesquisas científicas como apresenta a Tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Propriedades de concretos permeáveis apresentadas na literatura científica.

Referência	Índice de vazios (%)		Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )		Permeabilidade (mm/s)		Resistência à Compressão (MPa)		Resistência à flexão (MPa)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Arthur; Silva; Krambeck (2017)	21,90	29,00	-	-	12,79	21,57	1,37	5,37	-	-
Bechara (2017)	19,08	26,66	2,09	2,26	2,07	3,87	-	-	2,48	3,43
Oliveira (2017)	31,70	35,10	1,96	1,97	1,44	4,51	11,50	14,00	2,00	2,70
Mahalingam; Mahalingam (2016)	20,95	28,16	-	-	8,60	19,80	5,05	15,87	1,88	3,21
Castro (2015)	20,00	33,00	-	-	11,00	67,00	2,04	11,36	-	-
Ćosić <i>et al.</i> (2015)	6,30	22,20	2,08	2,44	-	-	20,20	69,50	2,80	9,70
Jang <i>et al.</i> (2015)	24,00	34,00	1,09	1,41	-	-	1,50	9,50	-	-
Joshaghani <i>et al.</i> (2015)	18,70	40,40	1,72	1,90	8,80	16,30	5,50	9,40	1,60	3,70
Torres; Hu; Ramos (2015)	17,98	31,34	-	-	0,53	1,69	3,2	18,6	1,09	3,09
Zaetang <i>et al.</i> (2015)	30,50	33,70	1,47	1,50	6,00	13,00	5,70	8,60	-	-
Ibrahim <i>et al.</i> (2014)	30,00	42,00	1,64	1,88	15,00	28,20	1,06	6,95	0,20	1,32
Ribeiro (2014)	12,50	18,00	1,63	1,71	0,50	2,00	10,50	15,00	1,60	3,00
Alencar (2013)	13,20	20,40	2,42	2,80	-	-	10,40	31,30	-	-
Batezini (2013)	20,00	29,00	1,74	1,96	1,10	1,50	6,02	10,17	1,60	2,52
Khattab; Nouhy; Abdel-Hameed (2013)	-	-	1,50	1,94	1,03	2,67	3,60	9,10	0,74	3,75
Bhutta; Tsuruta; Mirza (2012)	18,00	28,00	1,62	1,74	2,50	33,00	11,86	26,15	2,20	4,80
Phan; Le (2012)	17,90	29,60	1,69	2,11	3,80	24,90	4,18	14,09	-	-
Lian; Zhuge; Beecham (2011)	18,50	34,57	1,73	2,24	-	-	11,50	49,00	-	-
Huang <i>et al.</i> (2010)	20,00	30,00	-	-	10,00	20,00	5,00	15,00	0,60	1,90
Kim; Lee (2010)	31,20	50,00	1,19	1,83	-	-	1,50	11,40	-	-
Lian; Zhuge (2010b)	7,50	16,60	1,93	2,24	3,98	12,64	19,00	33,20	-	-
<b>Média</b>	<b>25,29</b>		<b>1,86</b>		<b>11,31</b>		<b>13,11</b>		<b>2,58</b>	
<b>Desvio padrão</b>	<b>9,21</b>		<b>0,37</b>		<b>13,50</b>		<b>13,34</b>		<b>1,88</b>	
<b>Desvio médio</b>	<b>7,61</b>		<b>0,28</b>		<b>9,28</b>		<b>8,53</b>		<b>1,20</b>	

Fonte: Dados levantados pela autora nos trabalhos citados.

Nas pesquisas são comumente analisadas as propriedades mecânicas e hidráulicas, pois são as mais relevantes para a pavimentação permeável que é a

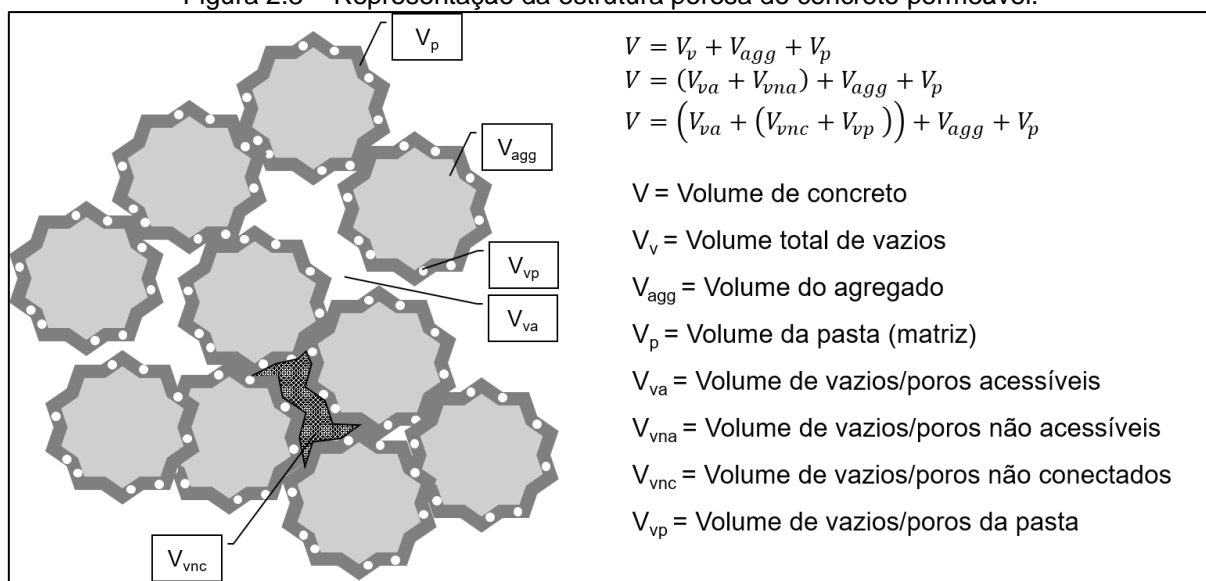
principal utilização do concreto permeável. É de senso comum entre os pesquisadores que estas propriedades são inversamente proporcionais, onde a melhoria de uma delas é acompanhada por prejuízos na outra.

Logo, o desafio das pesquisas para o uso do concreto permeável como revestimento de pavimentação permeável é a compreensão da influência da composição estrutural e das técnicas de produção no desempenho do material, para o alcance do equilíbrio das propriedades e garantia da resistência e permeabilidade necessárias.

### 2.3.1 Características Físicas

A caracterização física do concreto permeável se concentra, mas não se limita, na quantificação e aferição da interconectividade de vazios. Para Kevern, Wang e Shaefer (2009), a estrutura porosa do concreto permeável é composta por vazios intencionalmente obtidos pela dosagem, que irão facilitar a percolação e armazenamento da água, e por vazios naturalmente presentes na argamassa que recobre o agregado. A Figura 2.3 a seguir apresenta um esquema da estrutura porosa do concreto permeável proposto por Zhong; Wille (2016b):

Figura 2.3 – Representação da estrutura porosa do concreto permeável.



Fonte: Zhong; Wille (2016b) (Adaptado pela autora).

Esta estrutura porosa pode ser caracterizada por vários parâmetros, como, por exemplo, porosidade, tamanho dos poros e tortuosidade; e varia em função do tipo, tamanho e distribuição dos agregados, do volume de pasta e do método de compactação do concreto (SONEBI; BASSUONI; YAHIA, 2016). Dentre estes parâmetros, o mais comumente analisado é a porosidade, também chamada de índice de vazios. A ACI (2010) aponta como características do concreto permeável, porosidades na faixa de 15 a 25%.

Alguns autores diferenciam a porosidade total da porosidade efetiva (TORRES; HU; RAMOS, 2015; ZHONG e WILLE, 2016a). Para eles, a porosidade total reflete a relação entre o volume total de vazios (conectados e não-conectados) e o volume do espécime enquanto a porosidade efetiva expressa a relação entre o volume dos vazios conectados e o volume do espécime.

Zhong e Wille (2016a) apontam que a porosidade total deve ser relacionada à resistência do material, pois trata de todos os vazios do material, enquanto a porosidade efetiva deve ser associada à condutividade hidráulica uma vez que inclui somente os poros conectados que permitirão a percolação de água.

O estudo de Haselbalch e Freeman (2006) sobre a estrutura porosa dos concretos permeáveis indicou que é comum a obtenção de poros de pequeno tamanho na camada superior dos espécimes (menor porosidade), e uma maior porosidade na camada inferior, fazendo com que a porosidade cresça proporcionalmente à profundidade da camada analisada.

A massa específica do concreto às vezes chamada densidade é outra propriedade física correntemente analisada. Normalmente os valores obtidos para concretos permeáveis são menores que os do concreto convencional em decorrência da presença de vazios que tornam as misturas mais leves. Tennis, Leming e Akers (2004) dizem que a massa específica aparente do concreto permeável, varia entre 1300 a 2000kg/m<sup>3</sup>, sendo que o valor mínimo exigido pela NBR 16416 (ABNT, 2015), referente a pavimentação permeável de concreto, é de 1600kg/m<sup>3</sup>.

Em relação ao efeito da composição e processamento do concreto sobre a massa específica, as pesquisas já comprovaram que agregados arredondados e densos e energias de compactação maiores aumentam a massa específica e reduzem

as porosidades do produto final (SULEIMAN *et al.*, 2006; LIAN; ZHUGE, 2010a; PHAN; LE, 2012; PALMA E SILVA *et al.*, 2018b).

Outras características físicas típicas do concreto permeável que podem ser citadas são a consistência seca, a alta rugosidade e baixa trabalhabilidade, provenientes do diminuto percentual de finos e da baixa relação água/cimento (*a/c*). A presença reduzida de finos e de água na mistura alteram a textura superficial da mesma, deixando-a mais rugosa como se pode observar na Figura 2.4 abaixo:

Figura 2.4 – Textura visual do concreto permeável.



Fonte: Arquivo próprio.

A mudança na textura aumenta a aderência do material, prejudicando a sua consistência e trabalhabilidade e tornando o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) inadequado para o controle de produção.

À textura também é atribuída a melhoria na resistência ao deslizamento, decorrente do aumento do coeficiente de atrito. Para o uso do concreto permeável na pavimentação isto é considerado positivo, pois reduz o tempo de frenagem e os efeitos de ofuscamento e de aquaplanagem, decorrentes de chuvas e do acúmulo de neve e gelo, aumentando assim a segurança nas vias.

### 2.3.2 Características Mecânicas

A performance mecânica do concreto permeável é alvo da maioria das pesquisas sobre o material, pois é um dos parâmetros utilizados para o dimensionamento de pavimentos permeáveis. Assim como as outras propriedades, o desempenho mecânico do concreto é regido e relacionado à sua estrutura porosa,

sendo sensível a diversas variáveis. Esta sensibilidade se reflete na larga faixa de valores obtidos nos trabalhos científicos, como já apresentado na Tabela 2.1 (p. 25).

Comumente, o concreto permeável apresenta resistências à compressão no intervalo de 3,5 a 28MPa e de resistência à tração na flexão de até 3,8 MPa segundo o ACI (2010). Porém estudos laboratoriais como o de Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012) e Zhong e Wille (2016a) já obtiveram concretos com resistência maiores fazendo uso de aditivos.

No Brasil, a NBR 16416 (ABNT, 2015) exige valores de resistência superiores a 20MPa para compressão e a 1 ou 2MPa para flexão e tração na flexão, dependendo do tipo de revestimento de pavimentação que será executado com o concreto permeável produzido.

Na busca pela compreensão do comportamento mecânico do concreto permeável, e devido a sensibilidade do mesmo a vários fatores, as pesquisas buscam correlacionar apenas uma variável às propriedades mecânicas. Lian, Zhuge e Beecham (2011), por exemplo, analisaram o efeito da porosidade sobre as resistências e concluíram que volumes elevados de vazios (altas porosidades) reduzem a resistência mecânica e a rigidez do concreto, pois os poros são considerados defeitos que favorecem a ocorrência de fraturas, tornando o material mais frágil.

Chindaprasirt *et al.* (2008), Torres, Hu e Ramos (2015) e Zhong e Wille (2015; 2018) estudaram a relação existente entre as características da pasta e as propriedades mecânicas do concreto. Para eles, a espessura e a densidade da pasta são diretamente proporcionais ao desempenho mecânico, o que quer dizer que quanto mais densa e espessa for a pasta, maiores serão o consumo de cimento e as resistências da pasta e do concreto.

Trabalhos como o de Huang *et al.* (2010) e Nguyen *et al.* (2014) indicaram que o uso de granulometrias menores favorece a resistência e rigidez do concreto, o que levou ao estudo da adoção de agregado miúdo e a adição de materiais finos nas composições mais recentes.

De forma geral, assim como no concreto convencional, favorecem as características mecânicas: a presença de miúdos na composição e o uso de elevadas energias de compactação.

### 2.3.3 Características Hidráulicas

Para o uso em revestimento de pavimentos permeáveis, a NBR 16416 (ABNT, 2015) recomenda o uso de material com coeficiente de permeabilidade superior a 1mm/s. Porém, o ideal é que se faça um estudo pluviométrico local para saber a intensidade de precipitação típica a ser escoada pelo material.

Diferentemente das propriedades mecânicas, o desempenho hidráulico do concreto permeável é favorecido pela presença de vazios, uma vez que estes possibilitam a percolação e o armazenamento temporário da água. A ACI (2010) diz que um índice de vazios de 15% já é capaz de fornecer ao material a permeabilidade requerida.

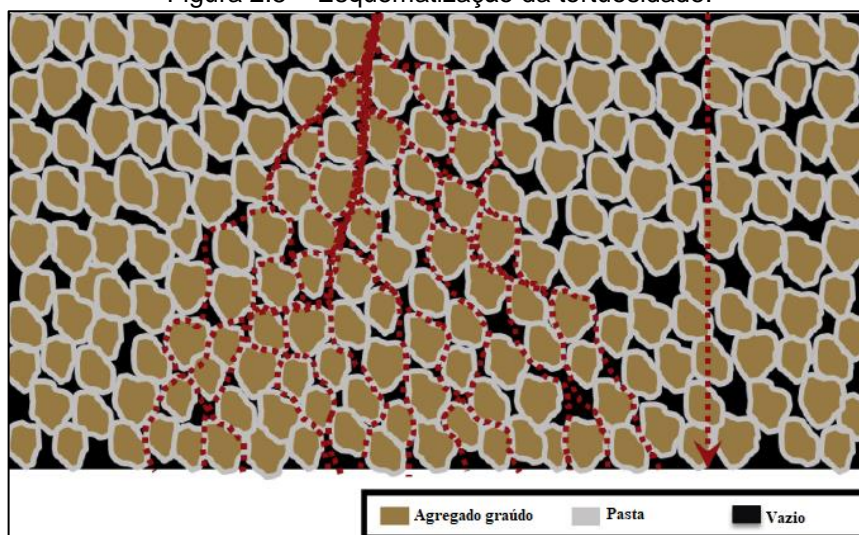
Apesar da porosidade e da permeabilidade estarem diretamente relacionadas, Torres, Hu e Ramos (2015), afirmam que elevados índices de vazios não garantem altas permeabilidades, uma vez que a permeabilidade depende do tamanho, da distribuição e da interconectividade dos vazios, e não somente do volume, que é o que a porosidade retrata. Por isso, os autores passaram a relacionar o desempenho hidráulico do material com a porosidade efetiva, que retrata a relação entre o volume de vazios conectados que permitem a percolação de água pelo material e o volume do espécime.

Logo, qualquer ação que favoreça o aumento da interconectividade entre os vazios do concreto, como o uso de granulometrias descontínuas ou uniformes e a aplicação de baixas energias de compactação, será benéfica à permeabilidade do material.

Além da porosidade, nos estudos mais recentes, outra propriedade física que tem sido relacionada com a capacidade drenante do concreto é a tortuosidade, que relaciona o comprimento do percurso percorrido pelo fluxo e o comprimento linear da amostra, como mostra a Figura 2.5:



Figura 2.5 – Esquematização da tortuosidade.



Fonte: Kia, Wong e Cheeseman (2017).

Tong (2011) afirma que tortuosidades maiores necessitam de tempos de percolação maiores, reduzindo assim a condutividade do material. Kia, Wong e Cheeseman (2017) acrescentam ainda que a tortuosidade é prejudicial à capacidade drenante dos concretos, por também favorecerem a colmatção pela maior probabilidade de acúmulo de sedimentos nos poros.

As variáveis de composição e produção também estão sendo relacionadas à capacidade drenante dos concretos uma vez que alteram a estrutura porosa do mesmo. Já foi comprovado que agregados angulares e maiores são componentes favoráveis, enquanto que adições minerais (sílica, cinzas volantes) e energias de compactação maiores são prejudiciais à permeabilidade (SULEIMAN *et al.*, 2006; LIAN e ZHUGE, 2010a; PHAN e LE, 2012; PALMA E SILVA *et al.*, 2018a).

Além da permeabilidade, o coeficiente de escoamento superficial do material, também chamado de coeficiente de deflúvio ou de *runoff*, também vem sendo estudado. Este coeficiente retrata a relação entre o volume de escoado superficialmente e o volume precipitado e comprova a capacidade de infiltração do concreto permeável, possibilitando o dimensionamento dos sistemas de drenagem (ALENCAR, 2013; ARAÚJO, 2018).

Além de todas as variáveis referentes ao material, esta propriedade depende ainda da inclinação da camada superficial, uma relação carente de estudos, uma vez que esta pode influenciar na velocidade do escoamento. Os resultados destes dois

autores, Alencar (2013) e Araújo (2018), comprovaram que os concretos permeáveis têm coeficientes de deflúvios baixíssimos, ao apresentarem escoamentos superficiais numericamente desprezíveis e retratando a alta capacidade infiltrante do material.

## 2.4 MATERIAIS

A composição do concreto permeável inclui obrigatoriamente os agregados graúdos, aglomerante e água, sendo opcional a inserção de agregados miúdos, aditivos e adições.

### 2.4.1 Agregados

Como as propriedades mecânicas estão diretamente relacionadas às características físicas dos agregados utilizados, as pesquisas analisam os efeitos da variação do tamanho, forma, tipo e distribuição dos agregados.

Quanto à composição granulométrica, Chandrappa e Biligiri (2016), em seu estudo do estado da arte sobre o concreto permeável, identificaram que as granulometrias mais utilizadas são as das faixas entre 19-2,36mm, ou seja, temos o uso de granulometrias graúdas e miúdas. Sendo que as misturas normalmente são compostas por granulometria única ou por combinação de apenas duas faixas granulométricas.

Os resultados de outras pesquisas apontaram que o uso de granulometrias maiores promove a melhoria da rugosidade e da porosidade do concreto, prejudicando a sua resistência mecânica e a trabalhabilidade e favorecendo a permeabilidade (PHAN; LE, 2012; LIU *et al.*, 2018).

Por outro lado, o uso de granulometrias finas tem efeito positivo nas resistências, cujos acréscimos são atribuídos ao aumento da superfície de contato dos agregados que leva ao aumento da força de ligação na interface agregado/pasta e à redução do índice de vazios pelo melhor empacotamento do grãos, aumentando assim a densidade do material (YANG; JIANG, 2003; ZHONG; WILLE, 2016a).

Shaefer *et al.* (2006), dizem em sua revisão de literatura que percentuais entre 5 e 10% de substituição em massa de granulometria graúda pela fina são

considerados ótimos para melhorar a resistência. Em seu trabalho experimental, adotaram um percentual de substituição de 7% e obtiveram um ganho na resistência de 46% acompanhado de uma perda de 60% da permeabilidade.

À inserção de agregados miúdos, também é atribuída a melhoria da trabalhabilidade, pela redução da rugosidade. Porém, Yang e Jiang (2003) e Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015) salientam que a adição de agregado miúdo só traz estes benefícios se as quantidades de água e cimento (relação a/c) forem ajustadas. Daí a importância de uma dosagem adequada para a obtenção de um material com propriedades que atendam às condições ambientais.

A tipologia dos agregados também pode ser associada às resistências das misturas uma vez que influi na aderência do agregado à pasta de cimento. Para Čosić *et al.* (2015), o tipo de agregado é mais influente sobre a porosidade efetiva do que o tamanho deles, pois agregados mais porosos, como a escória utilizada em seu estudo, permitem a penetração da pasta de cimento e a formação de uma ligação mais forte que pode melhorar a resistência.

#### 2.4.2 Aglomerantes

O aglomerante mais utilizado é o cimento Portland e sua função principal é o recobrimento e ligação dos agregados pela pasta. O consumo de cimento influencia na espessura da camada de pasta que cobre o agregado, que por sua vez afeta a porosidade e as propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto, sendo que camadas mais espessas de pasta reduzem a porosidade e a permeabilidade e melhoram as resistências (CHINDAPRASIRT *et al.*, 2008; TORRES; HU; RAMOS, 2015).

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), dos tipos de cimento existentes no mercado, os mais recomendados para a fabricação de pavimentos de concreto ou para elementos pré-moldados de concreto são o cimento composto (CP-II), o de alto-forno (CP-III) e o pozolânico (CP-IV) por conta das adições em sua composição que reduzem o calor de hidratação e aumentam a impermeabilidade e resistência do concreto (ABCP, 2020).

Dentre estes três tipos, CP-II, CP-III e CP-IV, o cimento composto é o que proporciona menor impermeabilidade ao concreto, devido aos menores percentuais de adição, sendo o mais indicado para a fabricação de concretos permeáveis.

#### 2.4.3 Aditivos e Adições

A inclusão de aditivos e adições visa principalmente a melhoria da trabalhabilidade, do tempo de pega e da resistência do concreto. Dentre os aditivos, os superplastificantes são os aditivos mais empregados, pois são recomendados para fabricação de concreto onde se necessita de baixa relação a/c e fluidez, como é o caso do concreto permeável. Também podem ser utilizados retardadores de pega, incorporadores de ar e modificadores de viscosidade.

Em relação aos aditivos, o estudo de Bhutta, Tsuruta e Mirza (2012) já comprovou que o uso de superplastificantes afeta significativamente as propriedades do concreto, pois deixa a pasta mais coesa, facilitando a ligação entre a pasta de cimento e os agregados e tornando o concreto mais resistente.

Quanto às adições, diversas foram estudadas: Jang *et al.* (2015) desenvolveram um concreto permeável ecoamigável composto por cinza de carvão e um ligante geopolimérico à base de cimento Portland, cinza volante e escória de alto-forno; Gesoğlu *et al.* (2014a; 2014b) em seus estudos analisaram os efeitos da adição de resíduos de borracha nas propriedades do concreto permeável. Já Giustozzi (2016) constatou que a adição de polímeros melhora a capacidade de compactação e retarda as ações de hidratação, sem alteração significativa de da porosidade e permeabilidade.

#### 2.5 DOSAGEM

A sensibilidade das propriedades do concreto à composição, ressalta a importância do conhecimento dos materiais utilizados e do uso de proporções adequadas para a obtenção das características requeridas.

Na elaboração de sua revisão bibliográfica, Bechara (2017) observou que os melhores valores de resistências mecânicas estão associados à equalização das

relações agregado/pasta e  $a/c$  que proporcionam economia de cimento e aumento do contato grão-grão, resultando na elevada consistência e baixa trabalhabilidade do material.

Deve-se ressaltar que, diferentemente da dosagem convencional, a dosagem do concreto não busca o excelente empacotamento dos grãos, pois este é prejudicial à permeabilidade.

### 2.5.1 Métodos de Dosagem

Para Kia, Wong e Cheeseman (2017), a dosagem do concreto permeável tem o objetivo de balancear a porosidade, o volume de pasta, a resistência e a trabalhabilidade. Para isto deve garantir a cobertura e ligação dos agregados e a formação de vazios interconectados, se baseando no consumo de cimento e na relação água/cimento a ser utilizada.

Muitos autores buscaram o desenvolvimento de métodos de dosagem que pudessem ser replicados em quaisquer condições, como exemplo podem ser citados:

- a) Nguyen *et al.* (2014), que desenvolveram um método baseado na quantificação da camada de pasta e na hipótese de que esta pasta tem a função única de revestimento do agregado sem contribuir para o preenchimento dos vazios;
- b) Yahia e Kabagire (2014) cuja dosagem relaciona o volume de pasta e vazios interconectados;
- c) Zheng, Chen e Wang (2012), que trabalharam a relação entre as propriedades físicas do agregado e a resistência e permeabilidade requeridas para o concreto;
- d) Castro *et al.* (2009), cujo consumo de cimento é baseado na relação água/cimento e no teor de vazios requerido.

A inexistência de um método padronizado e a possibilidade de inclusão de diversos materiais resulta em uma diversidade de valores de dosagem, como apresenta o Quadro 2.1 seguir:

Quadro 2.1 – Dosagens de concretos permeáveis apresentadas na literatura.

Fator	Valores
Consumo de cimento	150 – 700kg/m <sup>3</sup>
Agregado graúdo	1100 – 2800kg/m <sup>3</sup>
Agregado miúdo	0 – 100kg/m <sup>3</sup>
Relação a/c	0,2 – 0,5
Relação agregado/pasta	2 – 12

Fonte: Kia, Wong e Cheeseman (2017).

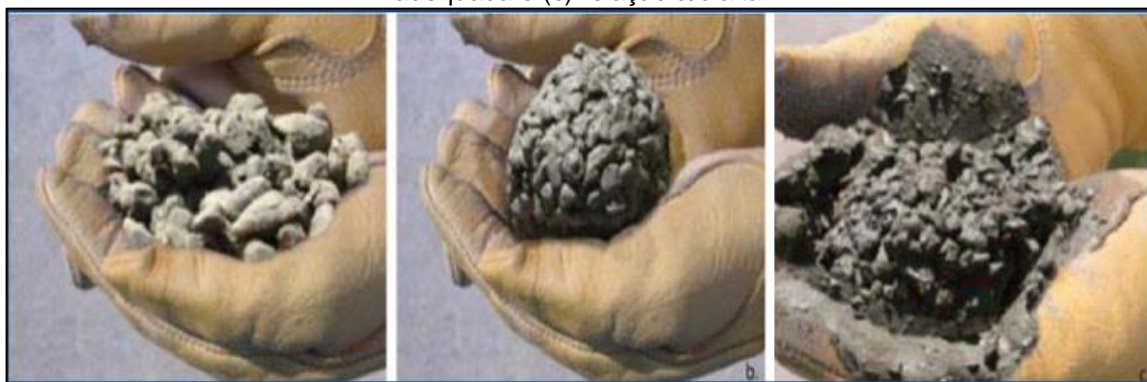
### 2.5.2 Relação Água/Cimento

A relação *a/c* está diretamente relacionada à resistência do concreto pois é uma fonte de incorporação de ar na mistura e possibilita a ocorrência das reações de hidratação do material cimentício.

De forma geral, a dosagem do concreto permeável inclui uma baixa relação água/cimento. A ACI (2010) aponta que relações *a/c* entre 0,26 e 0,45 são capazes de garantir a cobertura dos agregados e estabilidade da pasta.

Valores de *a/c* baixos prejudicam a coesão, e conseqüentemente, a trabalhabilidade da mistura. Por outro lado, relações *a/c* altas podem causar a segregação do material, assim como no concreto convencional, com o acúmulo da pasta no fundo da amostra o que isola a camada deixando-a impermeável. A Figura 2.6 apresenta a coesão de concretos produzidos com diferentes relações *a/c*:

Figura 2.6 – Ensaio de coesão de um concreto permeável com (a) baixa relação *a/c*, (b) relação *a/c* adequada e (c) relação *a/c* alta.



Fonte: Kevern, Shaefer e Wang (2008 *apud* Tong, 2011).

Na figura é possível perceber que uma relação *a/c* adequada produz uma quantidade de pasta suficiente para o cobrimento e ligação dos agregados, não ficando o excesso de pasta nas mãos do operador.

### 2.5.3 Relação Agregado/Pasta

A relação agregado/pasta está diretamente associada à dosagem. Chandrappa e Biligiri (2016), apontaram como comuns os valores entre 4:1 e 12:1.

Relações elevadas produzem camadas de pasta mais espessas, que favorecem a resistência do concreto pela ligação mais forte entre os agregados e diminuem a permeabilidade pela redução do tamanho dos poros (CHINDAPRASIRT *et al.*, 2008; TORRES; HU; RAMOS, 2015; FILHO; PIERALISI; DELGADO, 2019).

## 2.6 PRODUÇÃO

As características diferenciadas deste concreto exigem adaptações dos procedimentos comuns para a realização dos ensaios de caracterização do material. Para referência tem-se as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), que possui um subcomitê de normatização estudo do concreto permeável, o C09.49. No Brasil ainda não existem normas para o estudo laboratorial deste tipo de concreto, sendo alguns pontos abordados na norma de pavimentação permeável de concreto, a NBR 16416 (ABNT, 2015).

### 2.6.1 Mistura e Concretagem

A superfície rugosa do material dificulta a concretagem, impedindo o bombeamento deste tipo de concreto.

Sua estrutura porosa facilita a perda de água pelo aumento da taxa de evaporação decorrente do aumento da área superficial. A maior taxa de evaporação diminui o tempo útil de trabalho do concreto, exigindo mistura e concretagem mais rápidas, o uso de retardadores de pega e/ou processos de adensamento e cura diferenciados.

Por não existir no país, um método normatizado para a produção deste tipo de concreto, muitas variáveis de produção podem e foram avaliadas, sendo a principal delas a energia de compactação/adensamento.

Estudos como o de Suleiman *et al.* (2006), Torres, Hu e Ramos (2015), Sonebi, Bassuoni; Yahia (2016) e Palma e Silva *et al.* (2018b), já relacionaram o efeito da mesma na porosidade e propriedades mecânicas do concreto e concluíram que energias de compactação elevadas reduzem a porosidade do concreto ampliando a sua resistência mecânica e diminuindo a sua permeabilidade.

### 2.6.2 Cura

A estrutura porosa do material facilita a perda de água, o que aumenta a importância do processo de cura para a garantia das reações de hidratação e ganho de resistência mecânica.

Normalmente a cura inicia-se com a aspersão de água e, posteriormente é feita a cobertura da superfície livre com um material plástico, como mostra a Figura 2.7. Porém também podem ser utilizados compostos para formação de película antievaporação.

Figura 2.7 – Cura com (a) a aspersão de água e (b) cobertura da superfície livre com material plástico.



Fonte: Lamb (2014).

## 2.7 MANUTENÇÃO

A manutenção inclui atividades de prevenção do acúmulo e de remoção dos detritos que levam ao tamponamento dos poros (colmatação) e à redução da vida útil do material. Os métodos de manutenção incluem o paisagismo, que deve impedir a



circulação de sedimentos sobre o material, e técnicas de remoção dos detritos (lavagem sob pressão, aspiração à vácuo e varrição mecânica ou manual).

A ABNT e a ACI possuem processos de limpeza parecidos: a ABNT recomenda a varrição seguida da lavagem sob pressão e posterior aspiração, enquanto que a ACI dispensa a atividade de varrição (ABNT, 2015; ACI, 2010). Estas técnicas são capazes de recuperar de 80 a 100% da condutividade hidráulica do pavimento, de acordo com os resultados apresentados por Balades *et al.* (1995 *apud* LAMB, 2014) e Kuang *et al.* (2007).

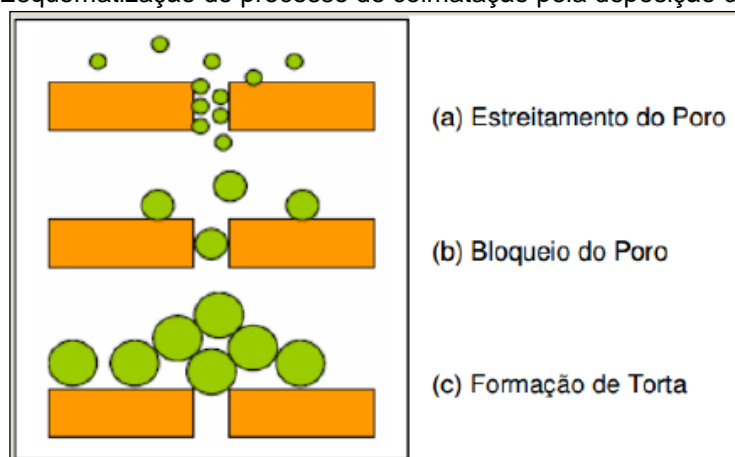
A eficácia da manutenção depende da distribuição, tamanho e conectividade dos poros e da localização da colmatação (OLIVEIRA, 2017). Kia, Wong e Cheeseman (2017) em sua revisão afirmaram que colmatação superficial por partículas grossas é facilmente recuperada com lavagem sob pressão e aspiração enquanto que a colmatação na parte inferior do concreto possui baixo índice de recuperação ao se utilizar os mesmos métodos.

No Brasil, de acordo com NBR 16416, que fala sobre pavimentação permeável de concreto, a periodicidade de manutenção e limpeza fica ao critério do projetista do pavimento, que estabelece os intervalos de verificação do desempenho do pavimento quanto à permeabilidade. Se for constatada a perda de condutibilidade hidráulica para valores inferiores a 0,1mm/s a limpeza deve ser realizada (ABNT, 2015).

## 2.8 COLMATAÇÃO

Colmatação é o fenômeno de perda da condutividade hidráulica, de forma lenta e progressiva, em decorrência do preenchimento dos vazios da estrutura pela deposição de finos, conforme ilustra a Figura 2.8, ou pelo desenvolvimento de micro-organismos (LAMB, 2014; SOUZA; CARVALHO, 2016).

Figura 2.8 – Esquemática do processo de colmatação pela deposição de sedimentos.



Fonte: SOUZA; CARVALHO, 2016.

Apesar de contribuir para a retenção físico-química de poluentes, uma vez que a superfície e o tempo de contato aumentam possibilitando a ligação dos elementos, auxiliando assim na purificação das águas pluviais, a colmatação é apontada como uma das principais causas das falhas e redução da vida útil do concreto permeável por reduzir a sua capacidade drenante (VIRGILIIS, 2009; TONG, 2011).

Segundo Kia, Wong e Cheeseman (2017), a colmatação pelo desenvolvimento de micro-organismos é facilitada pelas condições ambientais como umidade e presença de matéria orgânica, que favorecem o desenvolvimento de microrganismos que ocasionam o entupimento rápido dos poros.

Os mesmos autores ainda apontam que a velocidade/intensidade de colmatação pela deposição de sedimentos depende de três fatores:

- a) das características do material: retratadas pelo tamanho e conectividade dos poros;
- b) das condições ambientais: representadas pela tipologia dos sedimentos transportados, intensidade e duração pluviométrica e pela frequência e velocidade de passagem de veículos;
- c) da eficiência da manutenção do pavimento: aferida pelo poder de recuperação da drenabilidade do material com o uso de técnicas de limpeza (KIA; WONG;.CHEESEMAN, 2017).

Quanto à tipologia dos sedimentos, Oliveira (2017) afirma que estes podem ser metálicos originados da corrosão de elementos próximos, orgânicos quando existir vegetação circundante, partículas provenientes do desgaste natural do pavimento ou oleosos por derramamento de fluidos dos veículos.

Em seu estudo, a mesma autora comprovou que óleos não afetam significativamente a permeabilidade por serem imiscíveis com água formando macromoléculas que se depositam superficialmente e são carregadas pelo fluxo não infiltrando no material.

Em relação à granulometria dos sedimentos, Guthrie, Carson e Dennis (2007) comprovaram que partículas de tamanho médio, como a areia grossa, não alteraram significativamente a permeabilidade, pois pelo seu tamanho foram incapazes de adentrar a estrutura do concreto, mas impermeabilizaram o material ao selar a superfície com a formação de crosta.

E Kayhanian *et al.* (2012) apontaram que a presença de partículas muito pequenas, como argilas e siltes, causaram o tamponamento na camada inferior do concreto ou na zona de contato entre as demais camadas do pavimento, que são partes de difícil limpeza.

Estes e outros resultados relatados na literatura levam à conclusão de que todos os tamanhos provocam diminuição da capacidade drenante do concreto permeável, sendo que o modo de deposição das partículas é influenciado pela granulometria dos sedimentos e pelo tamanho dos poros do concreto.

Sobre as condições pluviométricas, Nichols, White e Lucke (2015) comprovaram que precipitações de maior duração e baixa intensidade favorecem a ocorrência da colmatação. Eles atribuíram este fato ao menor volume e velocidade de fluxo que permitiram o depósito das partículas nos poros de forma mais fácil do que ocorreria em fluxos intensos.

Quanto ao fluxo do tráfego, Virgiliis (2009) apresenta a hipótese de que a intensa passagem de veículos pode induzir a descolmatação por sucção e exemplifica descrevendo uma situação comparativa entre as pistas de rolamento e os acostamentos, onde os últimos que tendem a apresentar o acúmulo de água mais frequentemente do que as pistas de rolamento em decorrência da baixa passagem de veículos.

Kumar *et al.* (2016) contradizem esta hipótese através de seu estudo de campo, onde aferiram que a permeabilidade das faixas de tráfego é inferior à aferida nas faixas do acostamento, indicando que a passagem de veículos contribui para a colmatação do revestimento de concreto permeável.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA

O programa experimental foi elaborado objetivando a simulação em laboratório da colmatação do material e avaliação da sua evolução através da aferição da permeabilidade dos corpos de prova. Para tanto, foram determinadas as variáveis de resposta e os fatores de controle que são apresentados nos itens a seguir.

##### 3.1.1 Variáveis de Resposta

Considerando o objetivo do programa experimental, que é determinar as alterações na capacidade drenante do material causadas pela colmatação, e as características necessárias para sua utilização como material de revestimento de pavimentação de tráfego leve, foram escolhidas as seguintes variáveis de resposta:

- a) permeabilidade do concreto, por ser o fator de mensuração do efeito da colmatação e um dos requisitos de aceitação do material pela norma de pavimentação permeável de concreto, a NBR 16416 (ABNT, 2015);
- b) resistência à tração na flexão, que é requisito estabelecido na NBR 16416 (ABNT, 2015) para a utilização do concreto permeável como material de revestimento de pavimentação;
- c) massas específicas no estado fresco e endurecido, por também serem requisitos de norma.

##### 3.1.2 Fatores Controláveis

Sabendo que a evolução da colmatação depende tanto de características do material como das condições ambientais e da manutenção do pavimento, foram escolhidas variáveis que representassem cada um destes aspectos.

Do grupo das características do material foi adotado o percentual de agregado miúdo inserido na composição do concreto. A escolha é justificada pelo fato deste parâmetro de ter influência direta na porosidade do material, que é a principal

característica física relacionada à permeabilidade. Os percentuais de substituição, em massa do agregado graúdo, de 5%, 7,5% e 10% foram estabelecidos com base no intervalo considerado ideal apresentado no trabalho de Shaefer *et al.* (2006), que é de 5 a 10%.

As condições ambientais estão representadas pela tipologia dos sedimentos utilizados na simulação da colmatação: areia e argila. A escolha foi feita objetivando a análise do efeito do tamanho das partículas no modo de colmatação.

E a influência da manutenção será analisada a partir da capacidade drenante do material após a limpeza, sendo avaliado se este processo tem a capacidade de recuperar a permeabilidade do material.

### 3.1.3 Matriz Experimental

Após a definição dos parâmetros da pesquisa, elaborou-se a matriz experimental do estudo, que é apresentada no quadro a seguir:

Quadro 3.1 – Matriz experimental da pesquisa.

Nome dos grupos	Fatores Controláveis			Variáveis de Resposta		
	Percentual de Agregado Miúdo	Tipo de sedimento	Manutenção	Permeabilidade	Resistência mecânica	Massa específica
G0	0%	-	-	Coeficiente de permeabilidade: Método proposto pela ACI (2010)	Resistência à tração na flexão - NBR 12142 (ABNT, 2010)	Absorção, índice de vazios e massa específica no estado endurecido - ASTM C1754 (ASTM, 2012)
G0-S		Areia	Não			
G0-S-M			Sim			
G0-C		Argila	Não			
G0-C-M			Sim			
G5	5%	-	-			
G5-S		Areia	Não			
G5-S-M			Sim			
G5-C		Argila	Não			
G5-C-M			Sim			
G7,5	7,5%	-	-			
G7,5-S		Areia	Não			
G7,5-S-M			Sim			
G7,5-C		Argila	Não			
G7,5-C-M			Sim			
G10	10%	-	-			
G10-S		Areia	Não			
G10-S-M			Sim			
G10-C		Argila	Não			
G10-C-M			Sim			

Fonte: Elaboração própria.

Os nomes dos grupos foram dados de acordo com as variáveis adotadas: o numeral indica o percentual de agregado miúdo na composição; a primeira letra indica o tipo de sedimento utilizado na simulação da colmatação (S para areia e C para argila); e a última letra (se, houvesse) indicava a execução da limpeza. Logo as denominações indicavam:

- a) G0: grupo referencial sem agregado miúdo (não submetido à colmatação nem à limpeza);
- b) G0-S: grupo sem adição de agregado, submetido à colmatação por areia e sem limpeza;
- c) G0-S-M: grupo sem adição de agregado, submetido à colmatação por areia e à limpeza;
- d) G0-C: grupo sem adição de agregado, submetido à colmatação por argila e sem limpeza;
- e) G0-C-M: grupo sem adição de agregado, submetido à colmatação por argila e à limpeza;
- f) G5: grupo referencial com percentual de substituição de 5% (não submetido à colmatação nem à limpeza);
- g) G5-S: grupo com percentual de substituição de 5%, submetido à colmatação por areia e sem limpeza;
- h) G5-S-M: grupo com percentual de substituição de 5%, submetido à colmatação por areia e à limpeza;
- i) G5-C: grupo com percentual de substituição de 5%, submetido à colmatação por argila e sem limpeza;
- j) G5-C-M: grupo com percentual de substituição de 5%, submetido à colmatação por argila e à limpeza;
- k) G7,5: grupo referencial com percentual de substituição de 7,5% (não submetido à colmatação nem à limpeza);
- l) G7,5-S: grupo com percentual de substituição de 7,5%, submetido à colmatação por areia e sem limpeza;
- m) G7,5-S-M: grupo com percentual de substituição de 7,5%, submetido à colmatação por areia e à limpeza;

- n) G7,5-C: grupo com percentual de substituição de 7,5%, submetido à colmatação por argila e sem limpeza;
- o) G7,5-C-M: grupo com percentual de substituição de 7,5%, submetido à colmatação por argila e à limpeza
- p) G10: grupo referencial com percentual de substituição de 10% (não submetido à colmatação nem à limpeza);
- q) G10-S: grupo com percentual de substituição de 10%, submetido à colmatação por areia e sem limpeza;
- r) G10-S-M: grupo com percentual de substituição de 10%, submetido à colmatação por areia e à limpeza;
- s) G10-C: grupo com percentual de substituição de 10%, submetido à colmatação por argila e sem limpeza;
- t) G10-C-M: grupo com percentual de substituição de 10%, submetido à colmatação por argila e à limpeza.

Com base nesta matriz e nas diretrizes estabelecidas na norma de cada ensaio foi levantado o quantitativo dos corpos-de-prova a ser produzido, apresentado no Quadro 3.2 a seguir:

Quadro 3.2 – Quantitativo de corpos de prova produzidos.

Ensaio	Norma	Dimensões	Quantidade	Total
Coeficiente de permeabilidade	Método da ACI (ACI, 2010)	Cilíndricos 10x20cm	3 por grupo submetido à colmatação	48
Resistência à tração na flexão (28 dias)	NBR 12142 (ABNT, 2010)	Prismáticos 10x10x40cm	4 por grupo referencial	16
Massa específica e teor de vazios (EE)	ASTM C1754 (ASTM, 2012)	Cilíndricos 10x20cm	6 por grupo referencial	24

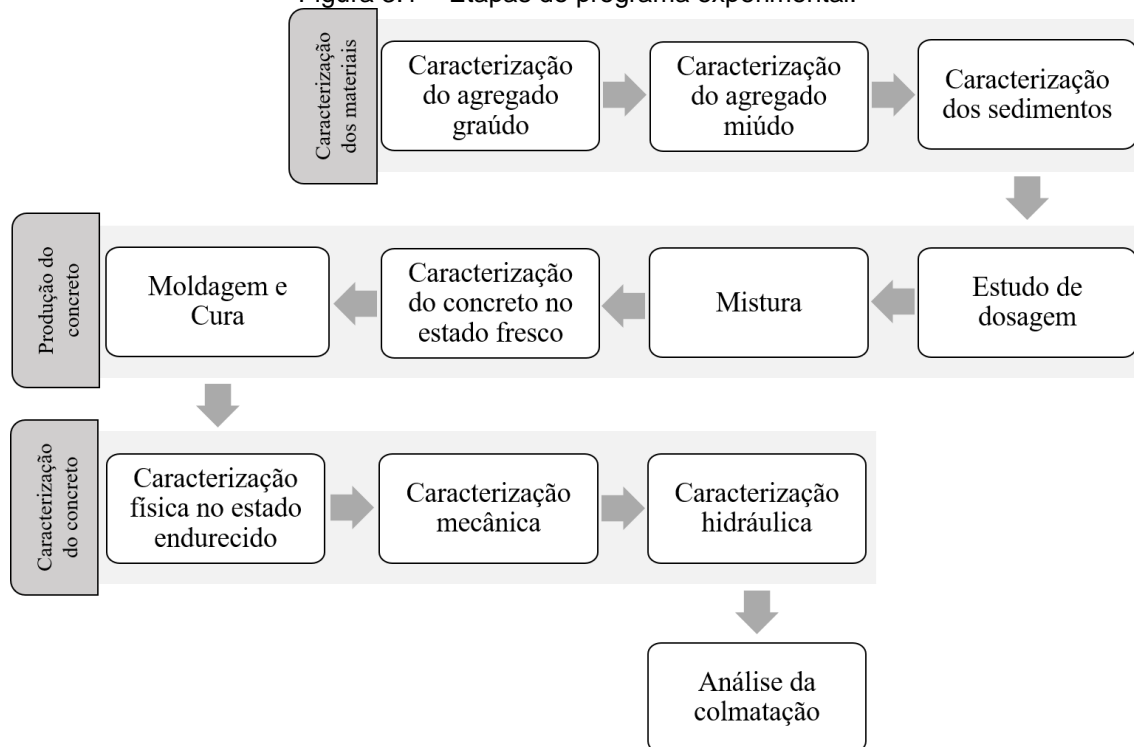
Fonte: Elaboração própria.

### 3.1.4 Etapas do Programa Experimental

O programa foi dividido em 4 etapas: caracterização dos materiais; produção do concreto; caracterização do concreto; e análise da colmatação como apresenta o fluxograma da Figura 3.1:



Figura 3.1 – Etapas do programa experimental.



Fonte: Elaboração própria.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

### 3.2.1 Aglomerante

Como aglomerante optou-se por utilizar o Cimento Portland do tipo CP-II-E 32, que possui adição de escória granulada de alto forno. A justificativa para esta escolha, além da disponibilidade do mercado local, foi decorrente da adequabilidade deste tipo para o fim requerido. A caracterização fornecida pelo fabricante é apresentada no Quadro 3.3:

Quadro 3.3 – Especificações técnicas do cimento utilizado.

<b>Características</b>	<b>Unidade</b>	<b>Prescrições</b>	<b>Valores</b>
Perda ao fogo (PF)	% da massa	≤8,5	5,7
Óxido de magnésio (MgO)	% da massa	-	5,4
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	% da massa	≤4,5	2,5
Resíduo insolúvel (RI)	% da massa	≤5,0	1,8
Resíduo na peneira 75µm	%	≤12,0	0,5
Tempo de início de pega	min	≥60	187
Tempo de fim de pega	min	≤600	247
Expansibilidade a quente	mm	≤5	0,0
Resistência à compressão (3 dias)	MPa	≥10,0	19,9
Resistência à compressão (7 dias)	MPa	≥20,0	26,4
Resistência à compressão (28 dias)	MPa	≥32,0	36,3
Massa específica	g/cm <sup>3</sup>	-	3,03

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018) e Votorantim Cimentos (2019).

### 3.2.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo empregado foi uma brita 0 comercial de origem basáltica. Sua caracterização incluiu a determinação da composição granulométrica, de acordo com os procedimentos estabelecidos na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003); das massas específicas seca, saturada e aparente, e do teor de absorção de água pelas diretrizes da NBR NM 53 (ABNT, 2009c); e da massa unitária e do índice de vazios pela NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Como resultados foram obtidos os valores da Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Composição granulométrica e características físicas do agregado graúdo (brita 0).

<b>BRITA 0</b>		
<b>Composição Granulométrica</b>		
<b>Peneiras</b>	<b>Material retido (%)</b>	
<b>Mm</b>	<b>Individual</b>	<b>Acumulado</b>
12,5	0%	0%
9,5	1%	1%
6,3	11%	12%
4,75	15%	27%
2,36	36%	63%
1,18	18%	81%
0,600	8%	89%
0,300	6%	95%
0,150	3%	98%
FUNDO	2%	100%
TOTAL	100%	-
<b>Características físicas</b>		
Módulo de finura		4,52
Dimensão máxima característica (mm)		9,5
Massa específica do agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )		2,76
Massa específica do agregado saturado com superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )		2,71
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )		2,68
Absorção de água (%)		1,09
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		1,38
Índice de vazios (%)		48,54

Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base nas diretrizes das NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 53 (ABNT, 2009c) e NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Pelos valores apresentados na Tabela 3.1 acima, pode-se observar que a maior parte do material ficou retida nas peneiras consideradas finas (inferiores a 2,36mm).

### 3.2.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia comercial lavada da região do rio Tocantins. A caracterização desta areia, assim como a do agregado graúdo, incluiu a determinação da sua composição granulométrica pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), das massas específicas e aparente pela NBR NM 52 (ABNT, 2009b), da absorção de água segundo a NBR NM 30 (ABNT, 2001) e da massa unitária e do índice de vazios pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). A Tabela 3.2 a seguir apresenta os valores obtidos:

Tabela 3.2 – Composição granulométrica e características físicas do agregado miúdo natural.

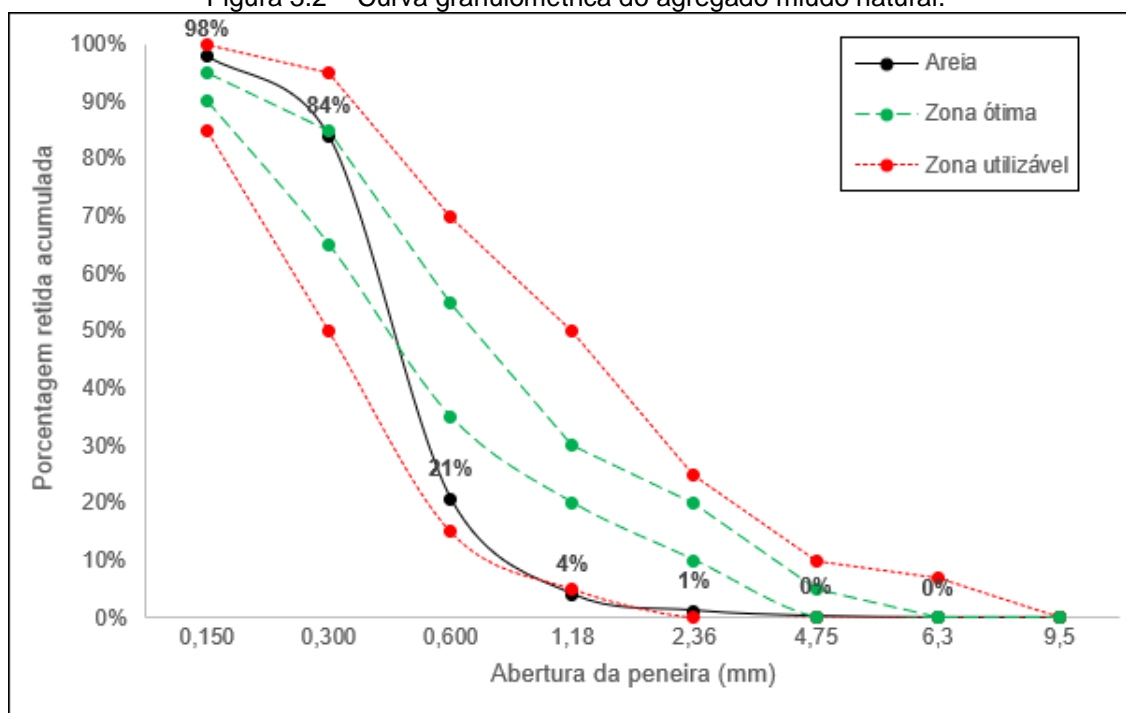
<b>AREIA MÉDIA</b>		
<b>Composição Granulométrica</b>		
<b>Peneiras</b>	<b>Material retido (%)</b>	
<b>mm</b>	<b>Individual</b>	<b>Acumulado</b>
4,75	0%	0%
2,36	1%	1%
1,18	3%	4%
0,600	17%	21%
0,300	63%	84%
0,150	14%	98%
FUNDO	2%	100%
TOTAL	100%	-
<b>Características físicas</b>		
Módulo de finura		2,06
Dimensão máxima característica (mm)		1,18
Massa específica do agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )		2,57
Massa específica do agregado saturado com superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )		2,58
Massa específica do agregado (g/cm <sup>3</sup> )		2,60
Absorção de água (%)		0,43
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		2,01
Índice de vazios (%)		22,56

Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base nas diretrizes das NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR NM 52 (ABNT, 2009b), NBR NM 30 (ABNT, 2001) e NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Pelo módulo de finura obtido esta areia é considerada uma areia fina, pois o seu módulo de finura, de 2,06, encontra-se dentro do intervalo de 1,55 a 2,20 estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2009a) para a zona utilizável inferior, que é zona considerada para classificação comercial da areia fina.

Esta característica é perceptível também na curva granulométrica apresentada na Figura 3.2 a seguir, onde vê-se que a composição granulométrica desta se aproxima dos valores estabelecidos para zona utilizável inferior.

Figura 3.2 – Curva granulométrica do agregado miúdo natural.



Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base na NBR NM 248 (ABNT, 2003) e limites da NBR 7211 (ABNT, 2009a).

### 3.2.4 Sedimentos

Para o ensaio de colmatção foram adotados dois tipos de sedimentos: um de granulometria mais grossa (areia) e outro de granulometria mais fina (argila).

A areia utilizada foi a mesma utilizada para a produção do concreto e suas características foram apresentadas na seção anterior.

A argila adotada é um latossolo amarelo da região. Sua caracterização incluiu a análise granulométrica, pela NBR 7181 (ABNT, 2017); a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade, NBR 6459 (ABNT, 2016a) e NBR 7180 (ABNT, 2016b), respectivamente; e o ensaio de compactação, seguindo as diretrizes da NBR 7182 (ABNT, 2016c).

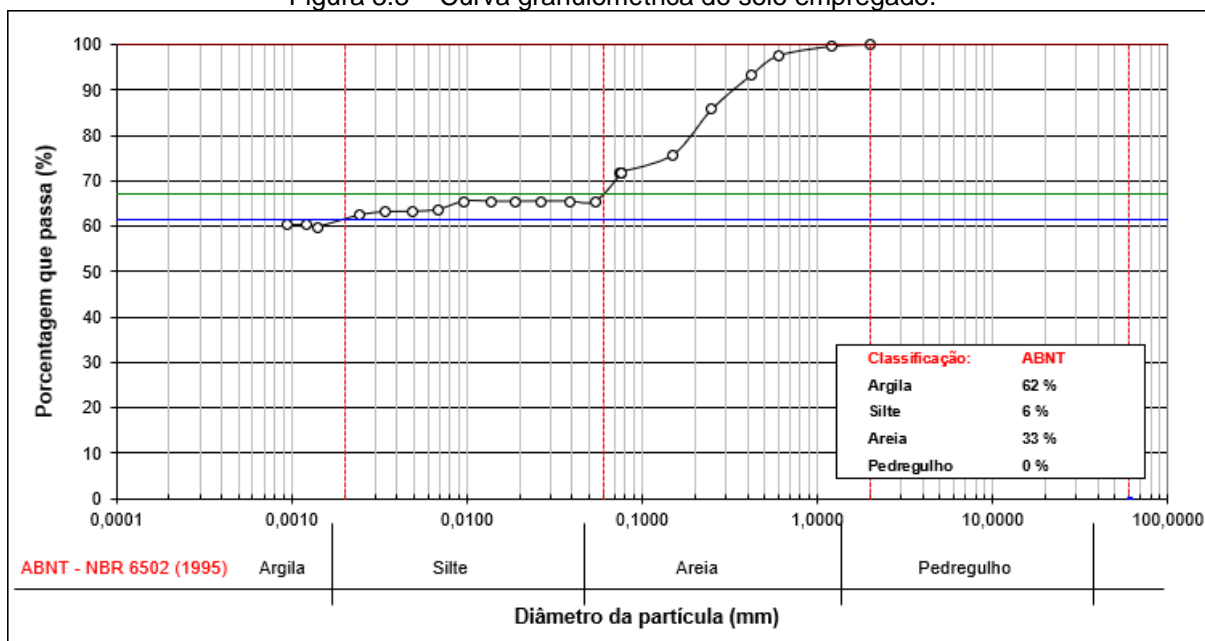
A preparação dos sedimentos incluiu somente a secagem em estufa. Suas características físicas são apresentadas na Tabela 3.3 e a curva granulométrica na Figura 3.3.

Tabela 3.3 – Características do solo empregado na colmatção.

Características	Solo
Limite de liquidez (LL)	51%
Limite de plasticidade (LP)	27%
Índice de plasticidade (IP)	24%
Umidade ótima (%)	5,46%
Peso específico aparente (kN/m <sup>3</sup> )	26,83

Fonte: Resultados laboratoriais com base nas diretrizes das NBR NM 52 (ABNT, 2009b), NBR 6459 (ABNT, 2016a), NBR 7180 (ABNT, 2016b), e NBR 7182 (NBR, 2016c).

Figura 3.3 – Curva granulométrica do solo empregado.



Fonte: Resultados laboratoriais com base na NBR 7181 (ABNT, 2017).

### 3.2.5 Água

A água utilizada tanto para a produção do concreto quanto para os ensaios de permeabilidade é proveniente do sistema de abastecimento local e em todas as etapas foi utilizada em temperatura ambiente.

### 3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO

#### 3.3.1 Estudo de Dosagem

##### 3.3.1.1 Seleção das composições granulométricas

Para as composições granulométricas foi utilizado como agregado graúdo o material passante na peneira de 9,5mm e retido na malha 4,8mm. A seleção desta faixa se baseou nos resultados de trabalhos já publicados que afirmam que a combinações com granulometrias menores favorece a resistência mecânica dos concretos produzidos, pelo melhor empacotamento da combinação (YANG; JIANG, 2003; LIAN; ZHUGE, 2010b).

Após a definição da faixa granulométrica foi realizado o peneiramento dos agregados para a obtenção da quantidade necessária para a caracterização das composições e produção do concreto. Após secagem ao ar livre, o peneiramento foi executado com o auxílio de um conjunto de peneiras quadradas de dimensões 50x50x10cm associado a um agitador eletromecânico.

Optou-se pela inclusão do agregado miúdo nas composições devido aos resultados dos estudos de Yang e Jiang (2003) e Shaefer *et al.* (2006) que confirmaram que substituição da granulometria graúda pela fina promovem a melhoria da resistência à compressão e tração.

Com o intuito de avaliar a influência da inserção dos agregados miúdos na porosidade, resistência mecânica e permeabilidade do material, foram adotados os percentuais de substituição em massa de 5%, 7,5% e 10% com base no trabalho de Shaefer *et al.* (2006), que afirmaram que o intervalo entre 5 e 10% de substituição em massa de granulometria graúda pela fina é considerado ótimo para melhorar a resistência.

A areia foi utilizada em sua granulometria original e sua preparação incluiu somente a secagem ao ar livre.

Logo as combinações granulométricas trabalhadas no programa experimental foram:

- a) G0 – Composição referencial, sem adição de agregado miúdo;

- b) G5 – Combinação granulométrica com 95% em massa de agregado graúdo e 5% de agregado miúdo (proporção 95/5);
- c) G7,5 – Combinação granulométrica com substituição de 7,5% da massa de agregado graúdo por agregado miúdo (proporção 92,5/5);
- d) G10 – Combinação granulométrica com 90% em massa de agregado graúdo e 10% de agregado miúdo (proporção 90/10).

Após a determinação das proporções das composições, foi realizado o ensaio de massa unitária e índice de vazios das mesmas de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006). A Tabela 3.4 apresenta os valores encontrados:

Tabela 3.4 – Caracterização das combinações granulométricas.

Percentual		Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )			Massa unitária da Combinação (g/cm <sup>3</sup> )	Índice de vazios (%)
Graúdo	Miúdo	Ag. Graúdo	Ag. miúdo	Combinação		
100	0	2,68	2,60	2,68	1,34	50,10
95	5	2,68	2,60	2,68	1,38	48,60
92,5	7,5	2,68	2,60	2,68	1,39	47,98
90	10	2,68	2,60	2,67	1,41	47,37

Fonte: Resultados laboratoriais com base na NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 52 (ABNT, 2009b) NBR NM 53 (ABNT, 2009c).

Nota-se que, que a inserção de agregado miúdo contribuiu para o aumento da massa unitária e redução do índice de vazios das combinações, confirmando o comportamento esperado de acordo com os resultados apresentados nos trabalhos de Bonicelli, Giustozzi e Crispino (2015) e Shaefer *et al.* (2006), estes últimos relatando redução de porosidade de 0,4% a 7%, para um percentual de substituição de agregados de 7%.

### 3.3.1.2 Dosagem experimental

O método de dosagem adotado foi o proposto por Castro *et al.* (2009) e se baseia na premissa de redução do volume de vazios do agregado pela penetração da pasta, dando o consumo de cimento ( $C_c$ ), em kg/m<sup>3</sup>, pela seguinte equação:



$$C_c = \left\{ \frac{[(V_v - 1) \cdot FC] + (0,96548) - (1,11359 \cdot V_{vc})}{\left[ \left( \frac{1}{\rho_c} \right) + (a/c) + \left( \frac{\%ad}{\rho_{ad}} \right) \right] \cdot FC} \right\} \cdot 1000 \quad (3.1)$$

Onde:

$V_v$  é o índice de vazios inicial de cada composição;

FC é o fator de compactação estabelecidos;

$V_{vc}$  é percentual de vazios conectados requerido para o concreto;

$\rho_c$  é a massa específica do cimento, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$a/c$  é a relação  $a/c$  selecionada;

$\%ad$  é o percentual de aditivo em massa;

$\rho_{ad}$  é a massa específica do aditivo, em  $\text{kg/m}^3$ .

O método foi selecionado a partir dos resultados apresentados por Silva *et al.* (2018) que trabalharam com este método de dosagem e faixas granulométricas similares obtendo resistência e permeabilidades satisfatórias.

O próprio método fixa um fator de compactação de 95%, sendo este o valor adotado. Para a relação  $a/c$ , os autores do método recomendam o uso de relações  $a/c$  iguais ou superiores a 0,32 (sendo  $a$  de 0,38 considerada ideal), pois nos valores inferiores estudados em seu trabalho, o concreto não apresentou coesão pela quantidade insuficiente de pasta. Lian e Zhuge (2010b) que estudaram as relações entre 0,30 e 0,38 em composições granulométricas semelhantes a deste trabalho e obtiveram os melhores resultados com o valor de 0,32. Com base nestas informações levantadas, foi adotado o valor de  $a/c$  de 0,32.

Quanto ao percentual de vazios conectados requerido para o concreto, Shaefer *et al.* (2006) dizem que o intervalo de 15 a 19% é capaz de obter permeabilidades e resistências adequadas. Resolveu-se optar pelo percentual intermediário de 17%, considerando a margem de desvio para os valores obtidos em campo e pela redução no consumo de cimento que a adoção deste percentual proporcionaria.

A Tabela 3.5 a seguir apresenta o consumo de cimento calculado para cada composição:

Tabela 3.5 – Dosagem calculada para cada composição.

Composição	Volume de vazios inicial - $V_v$ (%)	Consumo de cimento - $C_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	Volume de pasta - $V_p$ (%)	Traço em massa
G0	50,10	489,22	31,80	1 : 3,74:0,32
G5	48,60	466,09	30,30	1 : 0,20 : 3,81:0,32
G7,5	47,98	456,69	29,69	1 : 0,31 : 3,81:0,32
G10	47,37	447,28	29,09	1 : 0,42 : 3,82:0,32

Fonte: Elaboração própria.

Nos traços observa-se que a proporções adotadas para cada grupo são diferentes. Isto é resultado do método de dosagem adotado onde o consumo de cimento já é calculado a partir das características das combinações e sem a adoção de uma proporção regular. Pode-se determinar a proporção entre agregados e cimento a partir do consumo já obtido e da massa específica da combinação, conforme mostra a equação:

$$m = \rho_m \cdot \left[ \left( \frac{1}{C_c} \right) - \left( \frac{1}{\rho_c} \right) - \left( \frac{a/c}{\rho_w} \right) \right] \quad (3.2)$$

Onde:

$\rho_m$  é a massa específica da combinação em kg/m<sup>3</sup>;

$C_c$  é o consumo de cimento, em kg/m<sup>3</sup>,

$\rho_c$  é a massa específica do cimento, em kg/m<sup>3</sup>;

$a/c$  é a relação água cimento adotada;

$\rho_w$  é a massa específica da água, em kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.2 Produção dos corpos de prova

A produção do concreto se fez com o auxílio de betoneira elétrica de eixo inclinado de 600L e de acordo com as etapas propostas por Lamb (2014):

- adição de toda a massa de agregado e de 5% da massa de cimento;
- mistura (betonagem) por 1 minuto;
- adição do restante do cimento e da água;
- mistura por mais 3 minutos.

A moldagem foi realizada com adensamento manual por martelo com 20 golpes de altura de queda de 30cm em cada camada, seguindo as diretrizes da ASTM C1688 (ASTM, 2014). Após 24 horas os corpos-de-prova foram desmoldados e alocados em câmara úmida até a realização dos ensaios de caracterização.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

#### 3.4.1 Caracterização do Concreto no Estado Fresco

Após a produção do concreto foram feitos os ensaios de consistência, e de massa específica e teor de vazios.

A análise de consistência foi realizada com intuito de verificar a quantidade de pasta da mistura. O método utilizado foi o tátil-visual proposto por Tennis, Leming e Akers (2004), onde molda-se uma pequena bola manualmente e afere-se visualmente sua coesão e brilho.

O ensaio de massa específica foi realizado para verificar o atendimento ao requisito da norma NBR 16416 (ABNT, 2015) que diz que o concreto permeável moldado no local deve ter uma massa específica mínima de 1600kg/m<sup>3</sup> tanto no estado fresco quanto no endurecido, com uma tolerância de ±80kg/m<sup>3</sup>.

Para a determinação da massa específica e do índice de vazios seguiu-se as diretrizes da ASTM C1688 (ASTM, 2014), que é específica para concretos permeáveis, onde a massa específica é dada por:

$$\rho = \frac{m_c - m_r}{V_r} \quad (3.3)$$

Onde  $m_c$  é a massa do conjunto (recipiente + concreto),  $m_r$  é a massa do recipiente e  $V_r$  é o volume do recipiente.

E para o índice de vazios, tem-se:

$$I_v = \frac{\rho_t - \rho}{\rho_t} \quad (3.4)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica obtida por ensaio e  $\rho_t$  é a massa específica teórica obtida a partir das propriedades dos materiais.

### 3.4.2 Caracterização do Concreto no Estado Endurecido

A caracterização do concreto no estado endurecido incluiu a determinação do índice de vazios e da massa específica, da resistência à tração na flexão, e do coeficiente de permeabilidade.

A massa específica e o índice de vazios foram determinados com base nos procedimentos da ASTM C1754 (ASTM, 2012), que trata especificamente do concreto permeável e traz as seguintes equações para a massa específica e índice de vazios, respectivamente:

$$\rho = \frac{m_s}{V} \quad (3.5)$$

$$I_v = \left( 1 - \frac{m_s - m_{sub}}{V \cdot \rho_w} \right) \times 100 \quad (3.6)$$

Onde:

$m_s$  é a massa do corpo-de-prova seco;

$m_{sub}$  é a massa do corpo-de-prova submerso;

$V$  é o volume do corpo-de-prova;

$\rho_w$  é a massa específica da água.

O procedimento incluiu a secagem em estufa, pesagem, submersão e pesagem submersa dos corpos de prova.

Para a caracterização mecânica, os ensaios de resistência à tração na flexão foram executados de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010) com corpos de prova prismáticos obtidos a partir do corte de placas.

Na determinação do coeficiente de permeabilidade foi utilizado um permeâmetro de carga variável, Figura 3.4, semelhante ao apresentado no relatório sobre concreto permeável, o 522R, da ACI (ACI, 2010):

Figura 3.4 – Permeâmetro de carga variável utilizado.



Fonte: Arquivo pessoal.

Neste ensaio é aferido o tempo necessário para a redução do nível de água, até as marcas pré-estabelecidas. O cálculo da permeabilidade é dado então pela Equação 3.7 a seguir:

$$k = \left( \frac{A_t \cdot l}{A \cdot t} \right) \cdot \log \frac{h_i}{h_f} \quad (3.7)$$

Onde:

$A_t$  é a seção do tubo e  $A$  é a da amostra, em  $\text{mm}^2$ ;  $l$  é o comprimento da amostra, em  $\text{mm}$ ;  $t$  é o tempo médio de escoamento, em segundos (s);  $h_i$  e  $h_f$  são as alturas inicial e final da coluna d'água, em  $\text{mm}$ .

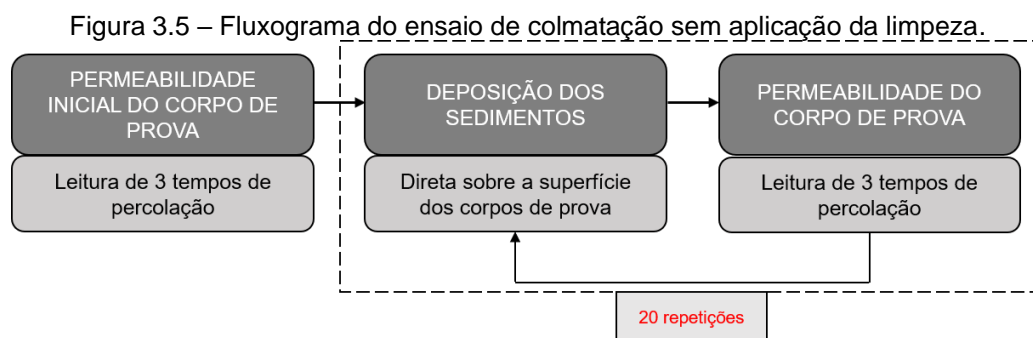
### 3.5 ANÁLISE DA COLMATAÇÃO

A análise da evolução da colmatação foi feita de forma indireta através da aferição da permeabilidade das amostras que eram submetidas a deposição de sedimentos.

O ensaio para análise da colmatação foi feito de acordo com a metodologia proposta por Tong (2011) e Shaefer *et al.* (2006), que fizeram análises semelhantes à

deste trabalho. Nesse método, a colmatção é simulada pela deposição direta de sedimentos sobre a face superficial dos corpos de prova que depois foram submetidos aos ensaios de permeabilidade e às técnicas de limpeza, se fosse o caso.

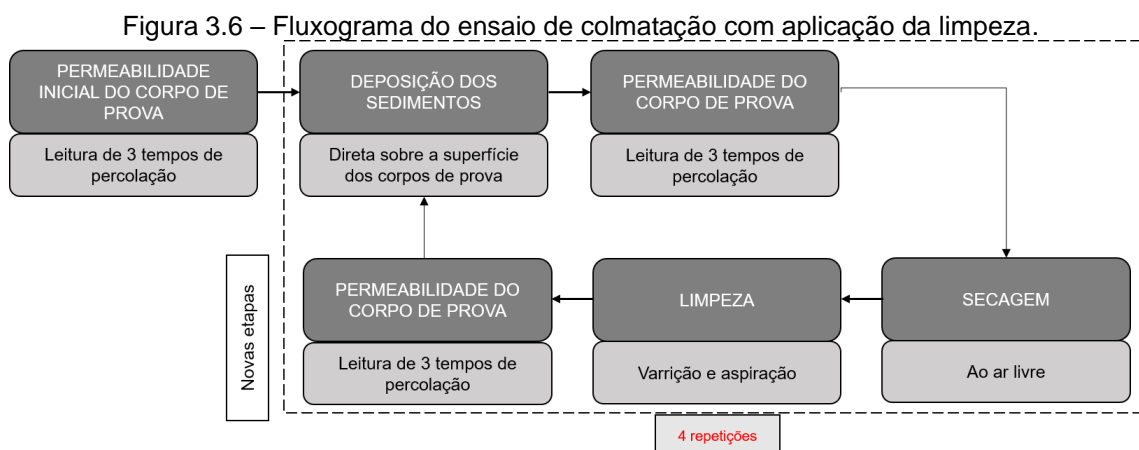
O fluxograma abaixo (Figura 3.5) apresenta as ações executadas para a realização do ensaio:



Fonte: Elaboração própria.

Seguindo a metodologia destes estudos embaixadores, Tong (2011) e Shaefer *et al.* (2006), foi adotado um carregamento considerado típico, de 5g de sedimentos para cada ano de utilização do material, e um tempo de utilização de 20 anos, o que levou a 20 repetições de cada ciclo de ações.

Nas simulações que consideravam a manutenção do pavimento, após cada ciclo de deposição e ensaio de permeabilidade subsequente, as amostras eram deixadas ao ar livre para secagem e posterior limpeza através da varrição e aspiração, como descreve o fluxograma da Figura 3.6.



Fonte: Elaboração própria.

A periodicidade da manutenção simulada foi de 5 anos, após ser observado que a colmatação anual não levava a uma perda de permeabilidade significativa. Para isto a quantia de sedimentos a ser depositada em cada ciclo se elevou para 25g (5g para cada ano de utilização) e a quantidade de repetições foi reduzida uma vez que o tempo de utilização (de 20 anos) foi mantido.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

#### 4.1.1 Consistência

Na análise da consistência, realizada de acordo com o método de Tennis, Leming e Akers (2004), observou-se a melhoria da coesão do concreto com o aumento do percentual de agregado miúdo. Isto representa uma melhor trabalhabilidade, com maior facilidade para moldagem e arrasamento dos corpos de prova. A Figura 4.1 apresenta a análise de consistência realizada para cada grupo:

Figura 4.1 – Análise tátil-visual da consistência.



Fonte: Arquivo próprio.

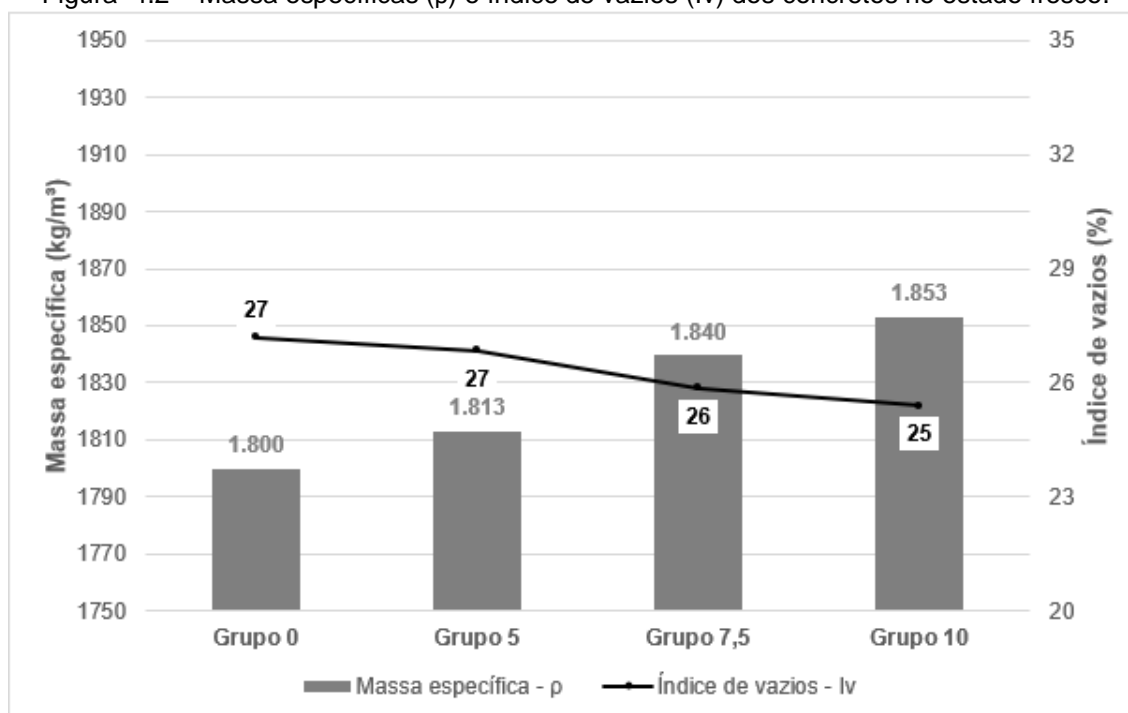
A melhoria da trabalhabilidade é atribuída ao aumento da superfície de contato, promovido pelo acréscimo do agregado miúdo, o que amplia a força de ligação na interface agregado/pasta deixando o concreto mais coeso (ZHONG; WILLE, 2016a).

#### 4.1.2 Massa Específica e Índice de Vazios

Os valores médios das massas específicas e dos índices de vazios obtidos para os concretos produzidos encontram-se no gráfico apresentado na Figura 4.2 na página a seguir:



Figura 4.2 – Massa específicas ( $\rho$ ) e índice de vazios ( $I_v$ ) dos concretos no estado fresco.



Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base na ASTM C1688 (ASTM, 2014).

Como esperado com base nas informações levantadas na revisão bibliográfica, a inserção de agregado miúdo contribuiu para o aumento da massa específica e redução do índice de vazios das misturas. Atribui-se este comportamento ao melhor empacotamento das composições devido ao preenchimento dos vazios pelo agregado miúdo.

As massas específicas obtidas variaram entre 1800 e 1853kg/m<sup>3</sup>, atendendo às diretrizes da normativa internacional ASTM C1688 (ASTM, 2014), com permanência dos valores no intervalo de 1750 a 2000kg/m<sup>3</sup>, e ao requisito de uso como material de revestimento de tráfego leve da NBR 16416 (ABNT, 2015) que exigem uma massa específica mínima de 1600kg/m<sup>3</sup>.

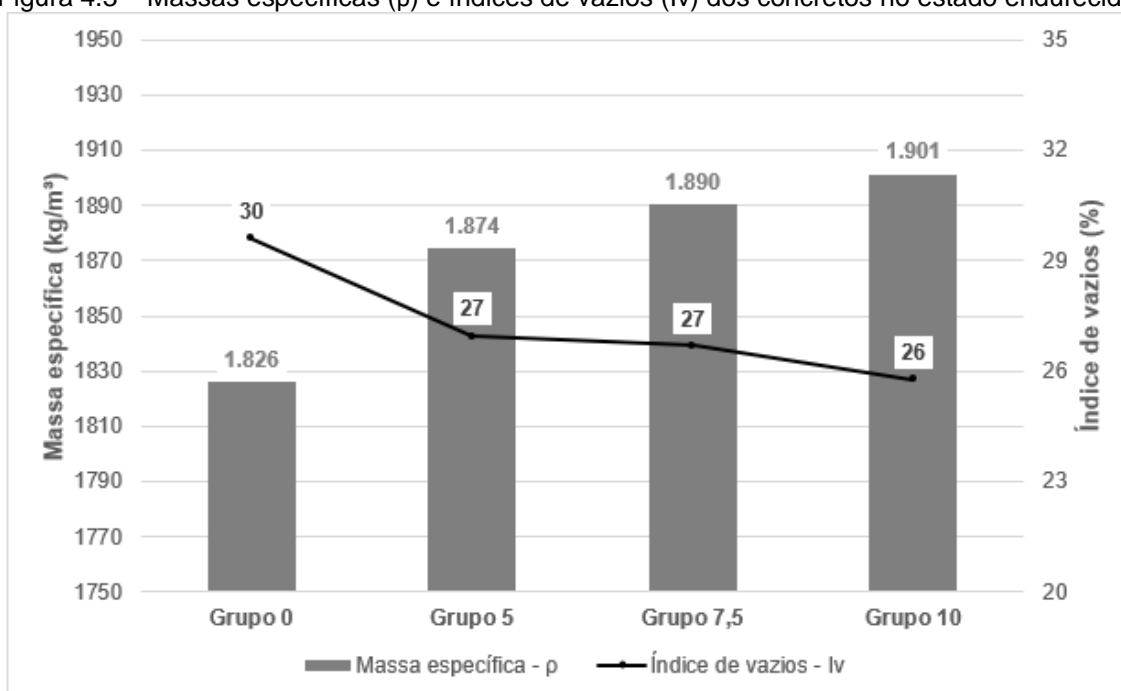
Assim como as massas específicas, os índices de vazios obtidos também se encontraram dentro do intervalo característico, de 15 a 30%, segundo as ACI (ACI, 2010).

## 4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

### 4.2.1 Massa Específica e Índice de Vazios

A Figura 4.3 abaixo apresenta as massas específicas e os índices de vazios médios obtidos para cada grupo:

Figura 4.3 – Massas específicas ( $\rho$ ) e índices de vazios ( $I_v$ ) dos concretos no estado endurecido.



Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base na ASTM C1754 (ASTM, 2012).

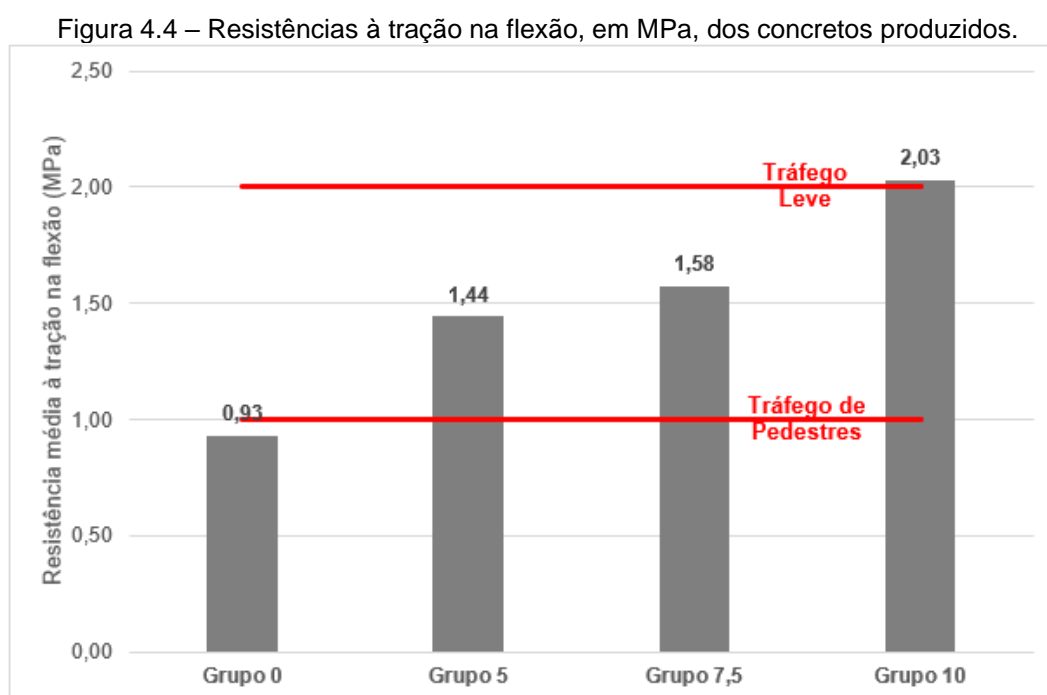
No gráfico acima é possível observar o crescimento da massa específica e a redução do índice de vazios dos concretos com o aumento do percentual de agregado miúdo na composição. Este comportamento já era esperado por ter ocorrido no estado fresco, sendo assim também justificado pelo melhor empacotamento das composições.

As massas específicas médias dos concretos variaram entre 1826 e 1901kg/m³, ficando dentro do intervalo considerado comum pela norma internacional, a ASTM C1754 (ASTM, 2012), de 1650 a 1943kg/m³, e atendendo o requisito para uso como revestimento de pavimentado indicado na normativa nacional, a NBR 16416 (ABNT, 2015), que exige um valor mínimo de 1600kg/m³.

Os índices de vazios, que variaram de 26 a 30%, também se enquadraram no intervalo considerado comum pela norma ASTM C1754 (ASTM, 2012), de 22,6 a 37,0%. O Anexo A apresenta as tabelas com os valores absolutos destes ensaios.

#### 4.2.2 Resistência à Tração na Flexão

A Figura 4.4 mostra os valores médios de resistência à tração na flexão obtidos para cada grupo. Os valores absolutos de cada grupo são apresentados no Anexo B.



Fonte: Resultados laboratoriais da autora obtidos com base na NBR 12142 (ABNT, 2010).

Observa-se que apenas o grupo G0 não atingiu os requisitos mecânicos mínimos da NBR 16416 (ABNT, 2015). Visto que os traços G5 e G7,5 demonstraram que esse material pode ser usado para o tráfego de pedestre, que tem um requisito de resistência mínima de 1MPa, e o G10 se apresenta como um material com potencial para o uso no tráfego leve.

Os valores apresentados são próximos, porém inferiores, aos resultados de Silva et al. (2018), cujo estudo utiliza uma granulometria semelhante, mas não utiliza agregado miúdo. Atribui-se essa proximidade de valores do estudo dele ao método de

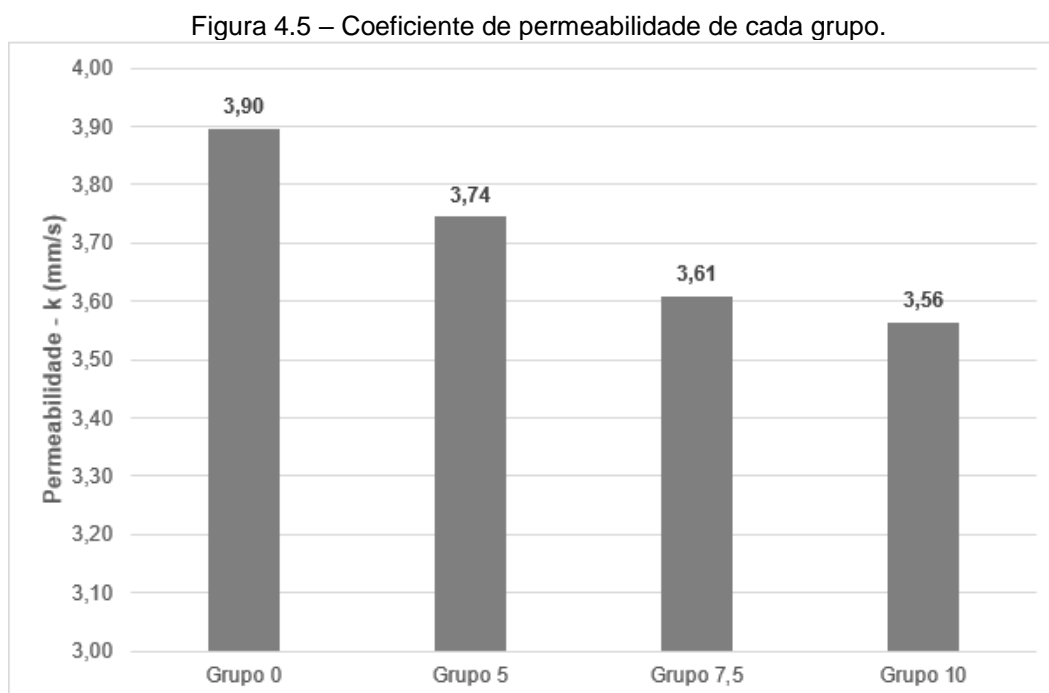
compactação utilizado por ele que proporcionava uma maior energia do que a utilizada nesta pesquisa.

O gráfico ainda permite visualizar o ganho de resistência, com percentuais de até 218%, para o percentual de substituição de 10%. Este comportamento é atribuído ao melhor empacotamento dos grãos e foi observado em outros estudos como de Shaefer *et al.* (2006) e Zhong e Wille (2016a), porém os valores não são equiparáveis pois os seus estudos utilizaram materiais, proporções e métodos de produção diferentes dos adotados nesta pesquisa.

#### 4.2.3 Permeabilidade

Os concretos produzidos apresentaram um bom comportamento hidráulico, com permeabilidades médias bem acima de 1mm/s que é o mínimo estabelecido pela norma nacional, a NBR 16416 (ABNT, 2015). Os valores absolutos das permeabilidades das amostras são apresentados no Anexo C.

A Figura 4.5 a seguir mostra as permeabilidades médias obtidas para cada composição:



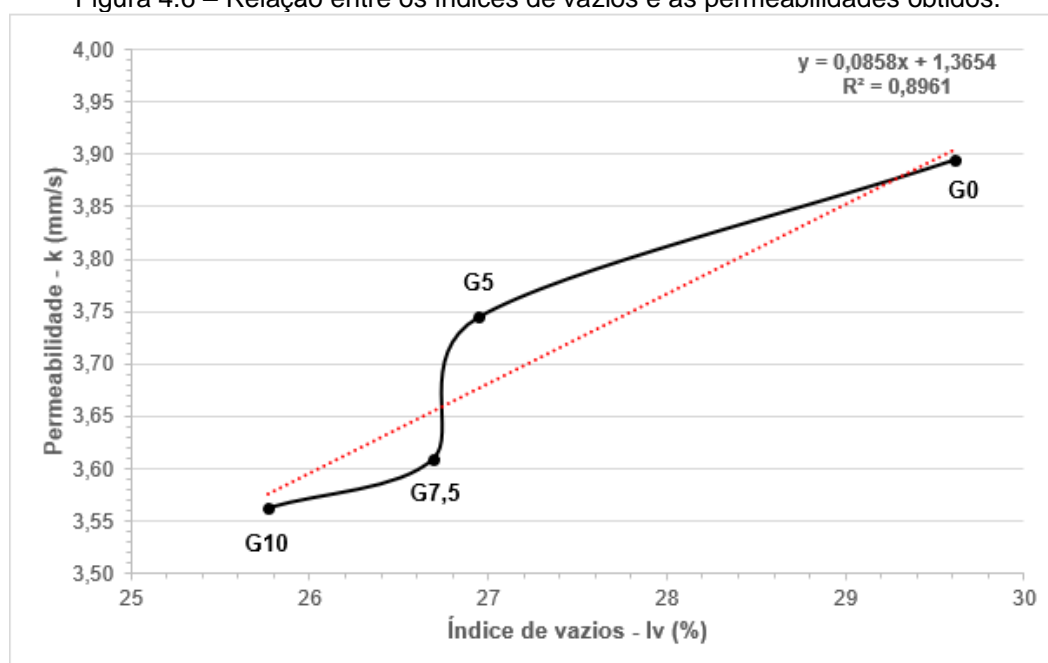
Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).

Como esperado a inserção do agregado miúdo promoveu a redução da permeabilidade dos concretos, uma vez que a porosidade deles também foi reduzida.

Os percentuais de redução da permeabilidade ficaram próximos a 10%, que são bem inferiores aos valores apresentados por Shaefer *et al.* (2006), que ficaram em torno de 60%. Junto com as elevadas permeabilidades obtidas, estes baixos percentuais de redução possibilitam a aplicação de maiores energias de compactação para a obtenção de maiores resistências mecânicas.

Relacionando as características físicas com a permeabilidade, no gráfico da Figura 4.6, onde cada ponto representa o valor médio de cada grupo, é possível visualizar o crescimento da permeabilidade proporcionalmente ao aumento do índice de vazios.

Figura 4.6 – Relação entre os índices de vazios e as permeabilidades obtidos.



Fonte: Resultados laboratoriais da autora obtidos com base na ASTM C1754 (ASTM, 2012) e ACI 522R (ACI, 2010).

Este comportamento já foi apresentado por outros autores como por exemplo, Yang e Jiang (2003), Shaefer *et al.* (2006), Zhong e Wille (2015), e outros que estudaram a influência da composição nas características dos concretos permeáveis produzidos, mas cujos valores não são comparáveis pelas diferenças no material e metodologia empregados.

### 4.3 EVOLUÇÃO DA COLMATAÇÃO

#### 4.3.1 Efeito da Colmatação sem a Limpeza do Material

A Tabela 4.1 abaixo contém os valores de permeabilidade inicial e final (após os 20 ciclos de deposição de material) obtidos para cada grupo:

Tabela 4.1 – Permeabilidade, em mm/s, antes e após o processo de colmatação.

		G0	G5	G7,5	G10
AREIA	Permeabilidade Inicial (mm/s)	4,16	3,95	3,62	3,67
	Permeabilidade Final (mm/s)	3,57	3,39	3,21	2,90
	Redução Absoluta (mm/s)	0,59	0,56	0,41	0,78
	Redução Percentual (%)	14,21%	14,21%	11,38%	21,13%
ARGILA	Permeabilidade Inicial (mm/s)	3,80	3,79	3,61	3,64
	Permeabilidade Final (mm/s)	3,48	3,34	3,12	3,04
	Redução Absoluta (mm/s)	0,32	0,45	0,50	0,60
	Redução Percentual (%)	8,45%	11,80%	13,79%	16,46%

Fonte: Resultados laboratoriais da autora obtidos com base na ACI 522R (ACI, 2010).

Observando os valores, é notável que mesmo após os 20 ciclos de deposição de sedimentos, todos os grupos atendiam ao critério de aceitação da NBR 16416 (ABNT, 2015) quanto a sua permeabilidade, ao apresentar permeabilidade finais superiores a 1mm/s. Este excelente comportamento hidráulico do material também é uma vantagem porque permite a adoção de intervalos maiores de tempo entre as manutenções.

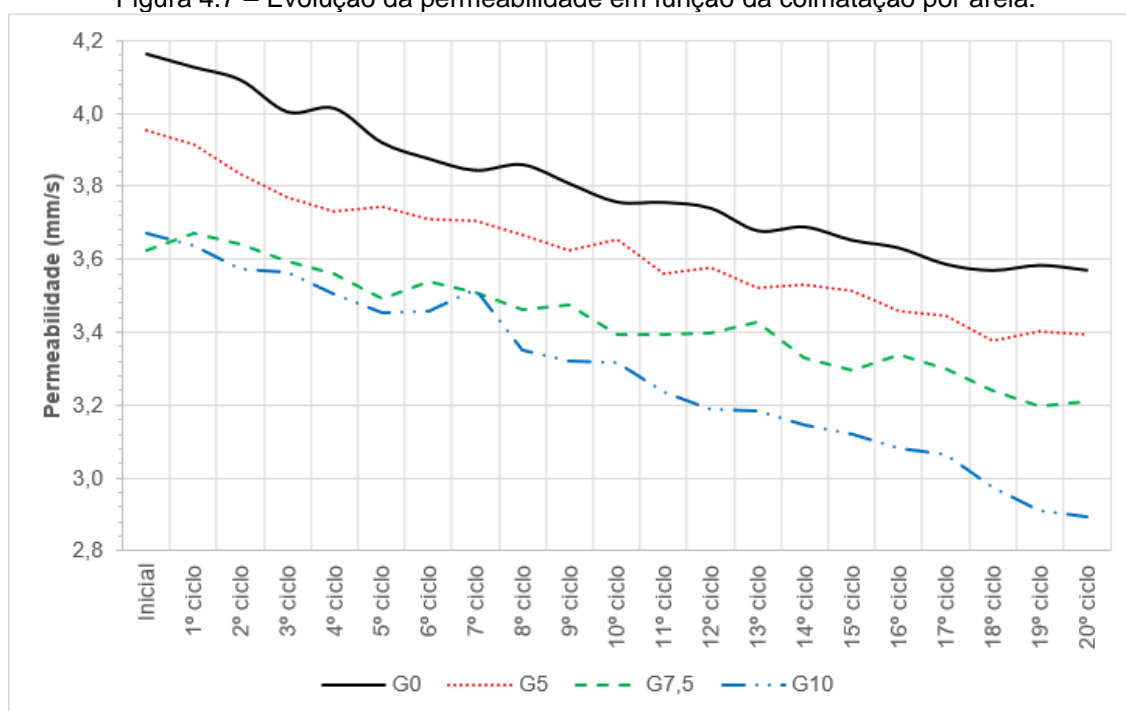
Os valores percentuais de perda de permeabilidade foram bem inferiores aos apresentados por Tong (2011), que fez um estudo sobre a colmatação e cujas perdas chegaram a até 86%, porém a diferença metodológica pode justificar as diferenças entre os valores apresentados.

Outro ponto que pode ser observado é que o grupo com maior percentual de agregado miúdo (G10) foi o que apresentou as maiores perdas de permeabilidade. Justifica-se este fato pelo melhor empacotamento dos grãos, o que reduz a quantidade e tamanho dos vazios do material favorecendo a retenção dos sedimentos nas camadas do mesmo.

Fazendo uma análise comparativa entre os tipos de sedimento, pode-se dizer que a colmatação por areia foi mais intensa que a colmatação por argila uma vez que

as taxas de redução da permeabilidade foram maiores. A Figura 4.7 abaixo mostra o comportamento da permeabilidade em função da colmatação por areia.

Figura 4.7 – Evolução da permeabilidade em função da colmatação por areia.

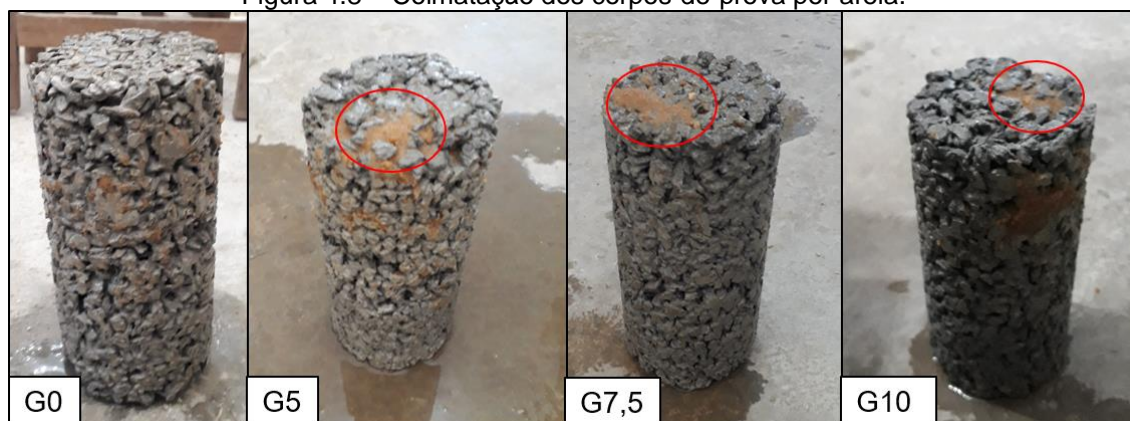


Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).

No gráfico é notável a redução da permeabilidade em todos os grupos, com os valores do 20º ciclo sendo inferiores ao do ciclo inicial. Como apresentado na Tabela 4.1 anteriormente, a redução percentual foi de 14,21% para o G0 e G5, de 11,38% para o G7,5 e de 21,13% para o G10. Valores bem diferentes dos apresentados por Mata (2008), Tong (2011), e Sandoval *et al.* (2020) que fizeram uma análise similar a esta, e encontraram reduções de entre 60 e 90%, porém o material produzido por eles possuía uma porosidade menor e a coluna d'água a que o material era submetida era maior, o que facilitou a retenção dos sedimentos.

A análise visual do processo de colmatação permite dizer que a areia tendeu a permanecer no topo do corpo de prova, como ilustra a Figura 4.8. Este comportamento também foi apresentado por Kia, Wong e Cheeseman (2017), cuja justificativa foi que os sedimentos de granulometrias maiores, devido ao tamanho das partículas, não são capazes de entrar na estrutura porosa do material, causando o tamponamento superficial.

Figura 4.8 – Colmatação dos corpos-de-prova por areia.

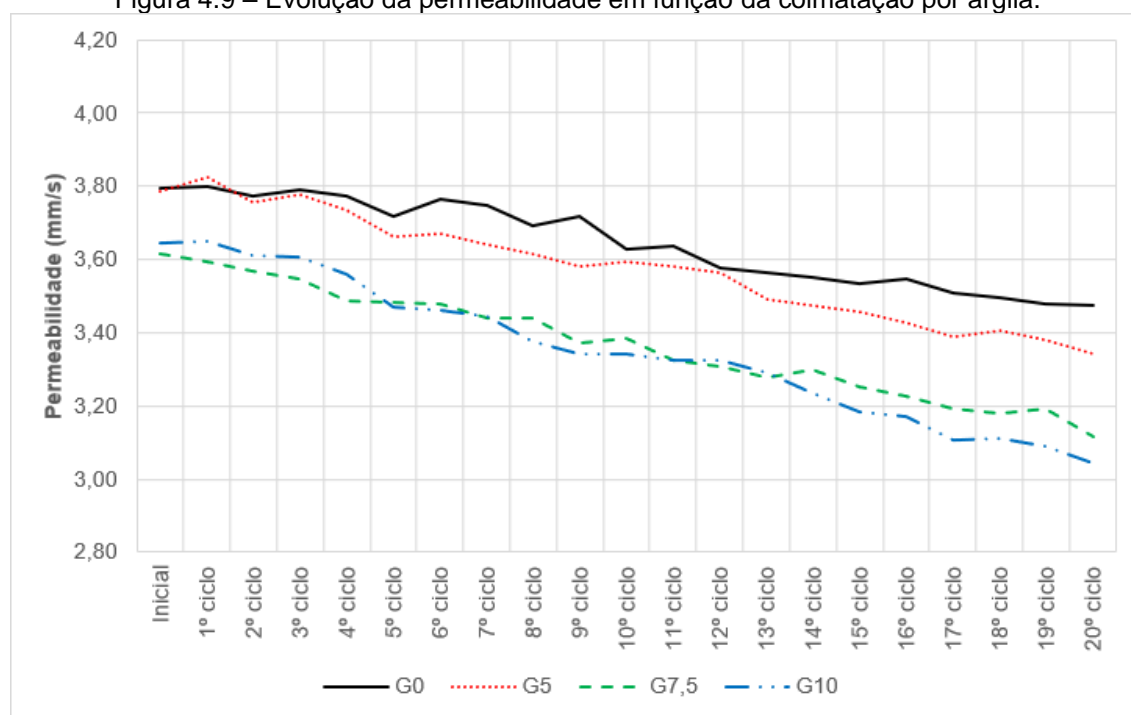


Fonte: Arquivo próprio.

Na sedimentação por argila, também foi observada a redução da permeabilidade em todos os grupos, com a redução da permeabilidade de 8,45% para o G0, de 11,80% para o G5, 13,79% para o G7,5 e de 16,46% para o G10.

A Figura 4.9 apresenta a evolução da permeabilidade de acordo com a deposição de argila:

Figura 4.9 – Evolução da permeabilidade em função da colmatação por argila.



Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).



Segundo Kia, Wong e Cheeseman (2017) a perda da permeabilidade pela argila decorre de sua natureza coesiva e pelo tamanho das partículas de argila que aumentam a sua capacidade aderente, fazendo que o sedimento permaneça nos poros do material nas camadas mais profundas. Este comportamento foi observado visualmente onde a argila, quando retida, se concentrava nas camadas inferiores do corpo de prova como mostra a Figura 4.10:

Figura 4.10 – Colmatação dos corpos-de-prova por argila.



Fonte: Arquivo próprio.

Outro comportamento a ser apresentado é o que o material permitiu a passagem da maior parte dos sedimentos, o que numa situação real implicaria em um processo de modificação estrutural e impermeabilização da camada abaixo do revestimento o que pode modificar o comportamento do pavimento como um todo

Logo pode-se afirmar que sedimentos de quaisquer granulometrias provocam a redução da permeabilidade, principalmente em concretos de menor porosidade, o que afeta a sua performance hidráulica a longo prazo.

O concreto permeável produzido nesta pesquisa tem um bom potencial para recuperação da permeabilidade caso seja feita a manutenção/limpeza periódica do pavimento.

#### 4.3.2 Efeito da Colmatação com a Limpeza do Material

Para a análise do efeito da limpeza do material são apresentados os valores da Tabela 4.2 a seguir. Nela observa-se que os grupos apresentaram baixas reduções na permeabilidade.

Tabela 4.2 – Permeabilidade, em mm/s, antes e após os ciclos de colmatação e limpeza.

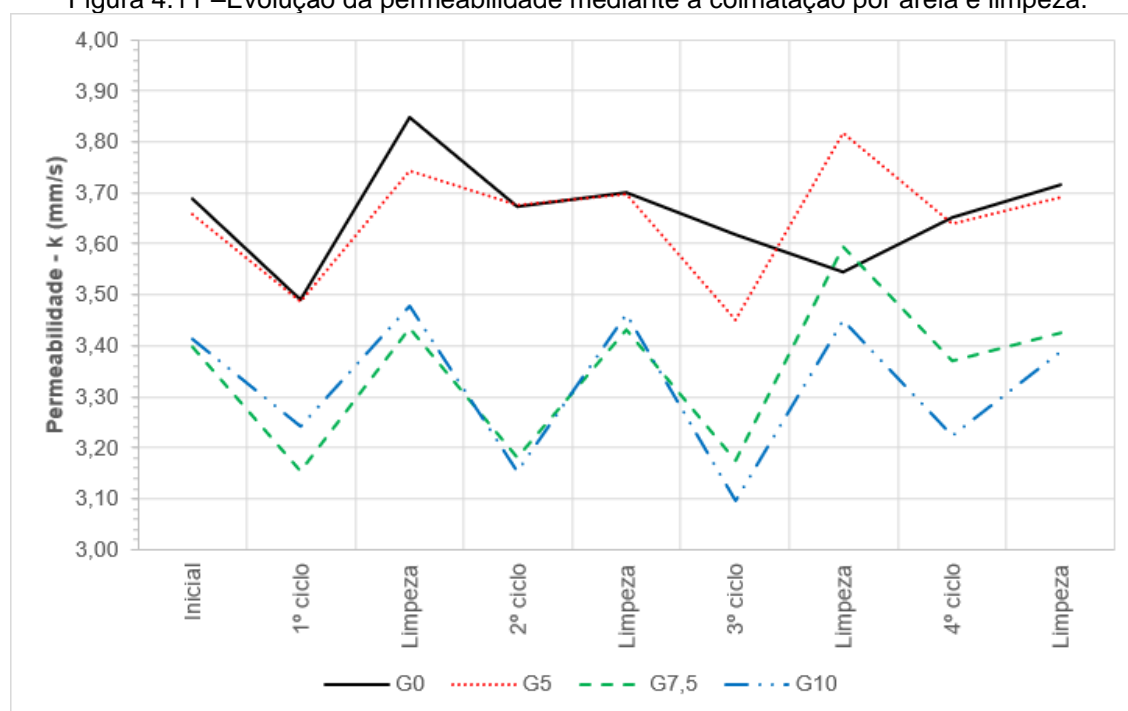
		G0	G5	G7,5	G10
AREIA	Permeabilidade Inicial (mm/s)	3,69	3,66	3,40	3,41
	Permeabilidade Final (mm/s)	3,72	3,69	3,42	3,39
	Redução Absoluta (mm/s)	-0,03	-0,04	-0,03	0,02
	Redução Percentual (%)	-0,73%	-0,97%	-0,75%	0,67%
ARGILA	Permeabilidade Inicial (mm/s)	3,93	3,84	3,54	3,52
	Permeabilidade Final (mm/s)	3,84	3,72	3,56	3,45
	Redução Absoluta (mm/s)	0,09	0,12	-0,01	0,07
	Redução Percentual (%)	2,28%	3,15%	-0,35%	2,01%

Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).

Nos casos em que houve o aumento na permeabilidade após os ciclos de sedimentação, atribuído aos desvios na leitura dos tempos de percolação que eram valores de proximidade de milésimos de segundo, considera-se que houve a recuperação total da permeabilidade.

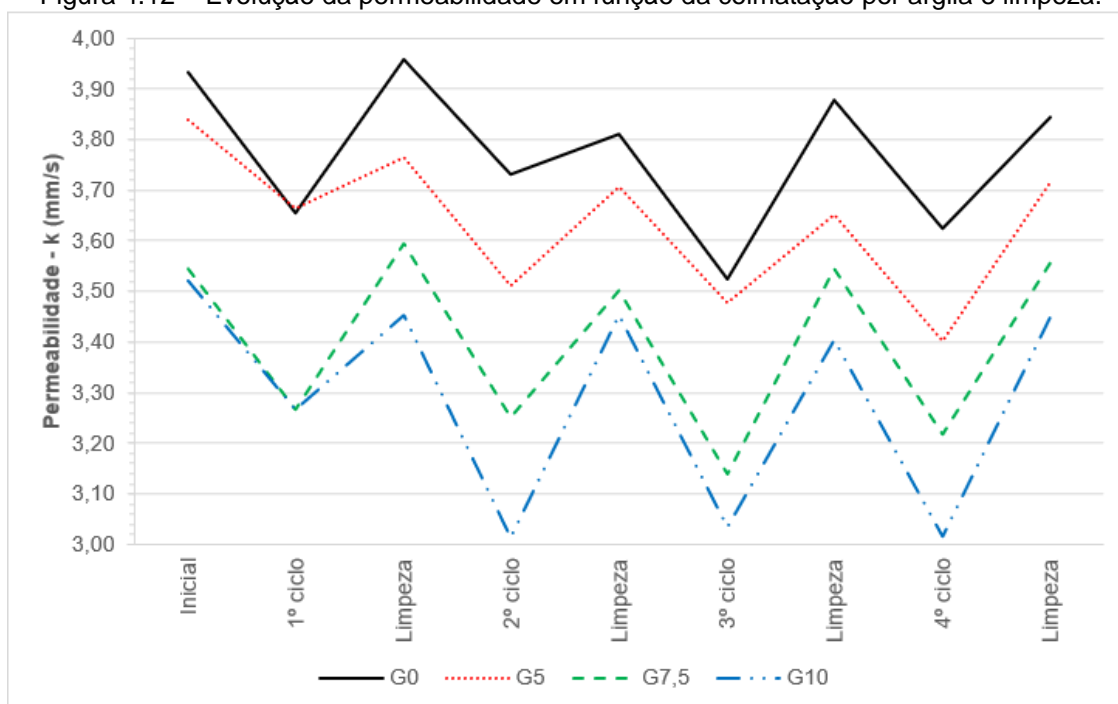
O comportamento hidráulico dos concretos produzidos mediante as ações de sedimentação e limpeza é apresentado nos gráficos das Figuras 4.11 e 4.12 a seguir:

Figura 4.11 –Evolução da permeabilidade mediante a colmatação por areia e limpeza.



Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).

Figura 4.12 – Evolução da permeabilidade em função da colmatação por argila e limpeza.



Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).

Como é visível nos gráficos, a limpeza do material foi capaz de recuperar a permeabilidade do material com a permeabilidade voltando aos valores semelhantes à dos ciclos anteriores, independentemente do tipo de sedimento adotado. Tong (2011) também conseguiu recuperar a permeabilidade do seu material, entretanto as taxas obtidas por ele foram inferiores a desta pesquisa e, acredita-se, que isso decorreu das características do material produzido por ele.

Na sedimentação por argila, os percentuais de redução da permeabilidade foram maiores, o que indica a eficiência da limpeza para este tipo de colmatação é menor, uma vez ocorreu uma maior perda de permeabilidade. Justifica-se este comportamento pela granulometria do sedimento, pois as partículas menores se aderiram ao interior da amostra, parte que é de difícil limpeza.

Ao analisar as alterações das capacidades drenantes do material, observou-se que a limpeza superficial é possível e capaz de recuperar a permeabilidade do material, o que indica que a vida útil do pavimento pode ser mantida com a limpeza periódica mesmo. O Anexo D deste trabalho apresenta os valores absolutos de permeabilidade obtidos durante os ensaios.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

#### 5.1.1 Quanto à Inserção do Agregado Miúdo

Seguindo o comportamento esperado de acordo com as informações levantadas na literatura científica, os resultados de caracterização do material, tanto do estado fresco quanto do estado endurecido, evidenciaram que a inserção do agregado miúdo nas composições promove: a melhoria da trabalhabilidade e da resistência mecânica e a redução dos valores de permeabilidade do material.

Esta relação pode ser justificada por: a inserção do percentual de agregado miúdo nas composições promoveu um melhor empacotamento, levando ao aumento da superfície de contato dos agregados e, conseqüentemente, das forças de ligação agregado/pasta e à redução do índice de vazios pelo preenchimento dos espaços, assim aumentando sua massa específica e reduzindo a permeabilidade.

A inserção de agregado miúdo garantiu a viabilidade técnica para o uso especificado, como revestimento de pavimento permeável de tráfego de pedestres. Sendo que o grupo com maior percentual de agregado miúdo na composição, o G10, tem potencial para uso como também no tráfego leve.

Acredita-se que pelos valores de permeabilidade apresentados pelo material, que são bem superiores aos exigidos pela normativa, este material ainda pode ter sua resistência mecânica melhorada com a aplicação de maiores energias de compactação.

#### 5.1.2 Quanto à Tipologia do Sedimento na Colmatação do Concreto

O estudo da colmatação das amostras permitiu afirmar que sedimentos de quaisquer granulometrias provocaram a redução da permeabilidade. Sendo que as granulometrias mais grossas tenderam a causar uma colmatação pelo tamponamento da camada superior dos espécimes enquanto que as granulometrias aderiram às camadas mais profundas do material.

O modo de colmatação, ocasionado por cada tipo de sedimento, influenciou também na recuperabilidade do pavimento. O acúmulo de sedimentos mais finos nas camadas profundas foi mais difícil de recuperar promovendo maiores perdas de permeabilidade ao material.

### 5.1.3 Quanto à Manutenção do Material e a Recuperação da Permeabilidade

A manutenção é capaz de garantir a vida útil do material, pois os processos adotados foram capazes de recuperar mais de 95% da capacidade drenante do material e em alguns casos houve a recuperação da permeabilidade total do material.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para enriquecer a bibliografia e difundir a técnica na região sugere-se:

- a) Realização deste estudo utilizando percentuais maiores de agregado miúdo;
- b) Viabilidade técnica do seixo rolado, que é agregado graúdo típico na região, para o concreto permeável;
- c) Estudo do efeito da colmatação com materiais oleaginosos, para efeitos de comparação com este estudo;
- d) Análise da influência da quantidade de sedimentos na velocidade de colmatação, com a aplicação de outros volumes de sedimentos;
- e) Avaliação experimental da pavimentação permeável na região, com a implantação e monitoramento da drenabilidade de pavimentos de concreto permeável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, Paulo Cezar Dias de. **Avaliação experimental do concreto poroso na atenuação do escoamento superficial em parcelas urbanizadas**. 2013. 174 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)–Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 522R-10**: Report on Pervious Concrete. Farmington Hills, 2010. ISBN 978-0-87031-364-6.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1688/C1688M**: Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete. West Conshohocken, 2014. 4 p.

\_\_\_\_\_. **ASTM C1754/C1754M**: Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete. West Conshohocken, 2012. 3 p.

ARAÚJO, Augusto Marlon Camargo de. **Desempenho do concreto permeável para drenagem urbana**. 2018. 25 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental)–Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

ARTHUR, André de Lima; SILVA, Giovane Antonio Bontorin; KRAMBECK, Leonardo. **Avaliação das propriedades de concretos porosos produzidos com diferentes granulometrias de agregado graúdo**. 2017. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)–Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Cimento**: diferentes tipos e aplicações. Disponível em: <[abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/](http://abcp.org.br/imprensa/artigos/cimento-diferentes-tipos-e-aplicacoes/)>. Acesso em: 25. jul. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez Rio de Janeiro, 2016. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2017. 12 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 9 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010. 5 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16416**: Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015. 25 p.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2018. 12 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 30**: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 10p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

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

BECHARA, Lourenço Augusto da Costa. **Concreto poroso como revestimento de pavimento permeável**: alternativa de drenagem urbana não estrutural à Região Metropolitana de Belém. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)–Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

BHUTTA, M. A. R.; TSURUTA, K.; MIRZA, J. Evaluation of high-performance porous concrete properties. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 67-73, 2012.

BONICELLI, A.; GIUSTOZZI, F.; CRISPINO, M. Experimental study on the effects of fine sand addition differentially compacted pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 102-110, 2015.

CASTRO, Javier. *et al.* Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 24, n. 3, p. 271-284, 2009.

CASTRO, Luiz Fernando Altermann de. **Estudo de traço de concreto permeável de cimento Portland**. 2015. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)–Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2015.

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

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

ĆOSIĆ, K. *et al.* Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 69-76, 2015.

FILHO, Sérgio Tunis Martins; PIERALISI,, Ricardo; DELGADO, João Matheus de Almeida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 61, 2019, FORTALEZA. **Anais do 61º Congresso Brasileiro do Concreto**. Fortaleza: IBRACON, 2019.

GESOĞLU, M. *et al.* Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 19-24, 2014.

GESOĞLU, M. *et al.* Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. **Construction and Building Materials**, v. 63, p. 206-213, 2014.

GIUSTOZZI, F. Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures. **Construction and Building Materials**, v. 111, p. 502-512, 2016.

GUTHRIE, W. S.; CARSON, B. D.; DENNIS, L. E. Effects of soil clogging and water saturation on freeze-thaw durability of pervious concrete. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 2164, p.89-97, 2007.

HASELBACH, Liv M.; FREEMAN, Robert M. Vertical Porosity Distributions in Pervious Concrete Pavement. **ACI Materials Journal**, v. 103, nº 6, 2006.

HÖLTZ, Fabiano da Costa. **Uso de Concreto Permeável na Drenagem Urbana: Análise da Viabilidade Técnica e do Impacto Ambiental**. 2011. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)–Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

HUANG, Baoshan. *et al.* Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 818-823, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico: Séries históricas**. Disponível em: <[https://www.ibge.gov.br/estatisticas-](https://www.ibge.gov.br/estatisticas)



novoportal/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=10503&t=series-historicas>. Acesso em 26 jul. 2018.

\_\_\_\_\_. **Perfil dos Municípios Brasileiros 2013**: Tabela 20 – Municípios, total e os atingidos em suas áreas urbanas nos últimos 5 anos, por enchentes ou inundações graduais, com indicação dos eventos com maior número de edificações atingidas e de ações para evitar ou minimizar os danos causados, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação – 2013. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Perfil\_Municipios/2013/pdf/tab20.pdf>. Acesso em 19 mar. 2018.

\_\_\_\_\_. **Tucuruí: Panorama**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/tucurui/panorama>. Acesso em 22 set. 2019.

IBRAHIM, Ahmed *et al.* Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 524-529, 2014.

JANG, J. G. *et al.* A novel eco-friendly porous concrete fabricated with coal ash and geopolymeric binder: Heavy metal leaching characteristics and compressive strength. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 173-181, 2015.

JOSHAGHANI, Alireza *et al.* Optimizing pervious concrete pavement mixture design by using the Taguchi method. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 317-325, 2015.

KAYHANIAN, Masoud *et al.* Permeability measurement and scan image to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, v. 95, p. 114-123, 2012.

KHATTAB, Enas A.; NOUHY, Hanan A.; ABDEL-HAMEED, Ghada D. Assessment of Porous Concrete Properties as a Function of Mix Proportions. **World Applied Sciences Journal**, v. 24, p. 751-758, 2013.

KEVERN, John T.; WANG, Kejin; SHAEFER Vernon R. Test Methods for Characterizing Air Void Systems in Portland Cement Pervious Concrete. **Journal of ASTM International**, v. 6, n. 9, ID Jai102451, 2009.

KIA, Alalea; WONG, Hong S.; CHEESEMAN, Christopher R. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 221-233, 2017.

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

KUANG, X. *et al.* Particle separation and hydrologic control by cementitious permeable pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, v. 2025, p.111-117, jan. 2007.

KUMAR, J. *et al.* In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot – a four year study. **Journal of Environmental Management**, v. 167, p. 8-14, 2016.

LAMB, Gisele Santoro. **Desenvolvimento e análise do desempenho dos elementos de drenagem fabricados em concreto permeável**. 2014. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Investigation of the effect of aggregate on the performance of permeable concrete. In: GHAFoori, N. (Ed.). **Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction**. Londres: CRC Press/Balkema, 2010. p. 505-510. ISBN 978-0-415-56809-8.

LIAN, C.; ZHUGE, Y. Optimum mix design of enhanced permeable concrete - An experimental investigation. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2664-2671, 2010.

LIAN, C.; ZHUGE, Y.; BEECHAM, S. The relationship between porosity and strength for porous concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 4294-4298, 2011.

LIU, Rentai *et al.* Investigation of the Porosity Distribution, Permeability, and Mechanical Performance of Pervious Concretes. **Processes**, v. 6 (7), n. 78, 2018. ISSN 2227-9717

MAHALINGAM, Rama; MAHALINGAM, Shanti Vaithiyalingam. Analysis of pervious concrete properties. **Gradevinar: Journal of the Croatian Association of Civil Engineers**, v. 6, p. 493-501, 2016.

MATA, Luis Alexander. **Sedimentation of Pervious Concrete Pavement Systems**. 2008. 288 f. Dissertation (Doctor of Philosophy in Civil Engineering)–North Carolina University, Raleigh, North Carolina, 2008.

NICHOLS, Peter W. B.; WHITE, Richard; LUCKE, Terry. Do sediment type and test durations affect results of laboratory-based, accelerated testing studies of permeable pavement clogging?. **Science of The Total Environment**, v. 511, p.786-791, 2015.

NGUYEN, D. H. *et al.* A modified method or the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 271-282, 2014.

OLIVEIRA, Lilian Corpas Bucene. **Análise da permeabilidade e da colmatação em concretos permeáveis com agregado reciclado de concreto**. 2017. 108 f.

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana)–Centro de Ciências Exatas, Ambientais e Tecnológicas, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

PALMA E SILVA, A. A. *et al.* A Influência da incorporação de sílica ativa no concreto poroso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018.

PALMA E SILVA, A. A. *et al.* Análise comparativa de métodos de adensamento para concreto poroso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018.

PHAN, Hung Duc; LE, Tuan Anh. Effect of aggregate type on the properties of porous concrete. In: The 2012 International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GSTD2012), 2012, Ho Chi Minh City. **Journal of Engineering Technology and Education**. Ho Chi Minh City: GTSD, 2012. P. 148-153.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. 255 p. Tese (Doutorado em Engenharia)–Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

RIBEIRO, Aline. **Concreto permeável com agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias)–Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, Centro de Ciências Exatas e da Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

SANDOVAL, G. F. B. *et al.* Hydraulic behavior variation of pervious concrete due to clogging. *Case Studies in Construction Materials*., v. 13, 2020.

SANTOS, Kesia Rodrigues dos. Inundações urbanas: um passeio pela literatura. **Elisée - Revista de Geografia da Universidade Estadual de Goiás**, v. 1, n. 1, p. 177-190, jan/jun. 2012.

SHAEFER, V. *et al.* **Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates**. 2006. 83 f. Final Report– Iowa State University, Center of Transportation Research and Education, Ames, 2006.

SILVA, M. R. C. A. *et al.* Desempenho mecânico e hidráulico de concreto permeável com uso de agregado graúdo de seixo rolado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 60, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto**. Foz do Iguaçu: IBRACON, 2018.

SONEBI, Mohammed; BASSUONI, Mohamed; YAHIA, Ammar. Pervious concrete: Mix Design, Properties and Applications. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 109-115, 2016.

SOUZA, O. R.; CARVALHO, R. F. de S. de. **Concreto poroso de seixo rolado para pavimento permeável moldado no local**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil)–Faculdade de Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

SULEIMAN, M. T. *et al.* Effect of Compaction Energy on Pervious Concrete Properties. **Proceedings of Concrete Technology Forum: Focus on Pervious Concrete**. Nashville, v. 5, p. 9-18, 2006.

TENNIS, Paul D.; LEMING, Michael L.; AKERS, David J. **Pervious Concrete Pavements**. EB 302. Skokie: Portland Cement Association; Silver Spring: National Ready Mixed Concrete Association, 2004. 36 p. ISBN 0-89312-242-4.

TONG, Bin. **Clogging effects of Portland cement pervious concrete**. 2011. 202 f. Thesis (Majoring of Science in Geotechnical Engineering)–Iowa State University, Ames, 2011.

TORRES, Anthony; HU, Jiong; RAMOS, Amy. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 950-859, 2015.

TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; BERTON, J. C. (Org). **Inundações Urbanas na América do Sul**, Porto Alegre: Associação Brasileira Recursos Hídricos, 2003.

TUCCI, Carlos E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades: Brasília, 2005; 270 pl.

UNITED NATIONS. Divisão das Nações Unidas para a População do Departamento dos Assuntos Económicos e Sociais. **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision**. Disponível em: < <https://esa.un.org/unpd/wup/>>. Acesso em 26 ago. 2018 às 10:39.

VIRGILIIS, Afonso Luís Corrêa de. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. 2009. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia)–Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Boletim de Ensaios de Cimento: Produto CPIIE-32 – TODAS AS OBRAS**. Atualizado em 03 jul. 2019.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). **Confronting the Urban Housing Crisis in the Global South: Adequate, Secure, and Affordable Housing**. Disponível em:

< <https://www.wri.org/wri-citiesforall/publication/confronting-urban-housing-crisis> >. Acesso em 11 mai. 2020 às 12:06.

YAHIA, Ammar; KABAGIRE, K. Daddy. New approach to proportion pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 62, p. 38-46, 2014.

YANG, J.; JIANG, G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. **Cement and Concrete Research**, v. 33, ed. 3, p. 381-386, 2003.

ZAETANG, Yuwadee *et al.* Use of coal ash as geopolymer binder and coarse aggregate in pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 96, p. 289-295, 2015.

ZHENG, Mulian; CHEN, Shuanfa; WANG, Binggang. Mix Design Method for Permeable Base of Porous Concrete. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 5, n. 2, p.102-107, 2012.

ZHONG, Rui; WILLE, Kay. Compression response of normal and high strength pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 177-187, 2016.

ZHONG, Rui; WILLE, Kay. Influence of matrix and pore system characteristics on the durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 132-141, 2018.

ZHONG, Rui; WILLE, Kay. Linking pore system characteristics to the compressive behavior of pervious concrete. **Cement and Concrete Composites**, v.70, p. 130-138, 2016.

ZHONG, Rui; WILLE, Kay. Material design and characterization of high performance pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 98, p. 51-60, 2015.

## ANEXO A – MASSAS ESPECÍFICAS E ÍNDICES DE VAZIOS DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Massas específicas ( $\rho$ ) dos concretos no estado endurecido.

	<b>Grupo 0</b>	<b>Grupo 5</b>	<b>Grupo 7,5</b>	<b>Grupo 10</b>
Amostra 1	1824,93	1864,15	1868,42	1853,45
Amostra 2	1824,74	1892,93	1905,85	1933,10
Amostra 3	1826,02	1901,26	1933,67	1895,34
Amostra 4	1872,49	1763,95	1829,07	1966,52
Amostra 5	1820,92	1901,20	1946,78	1872,68
Amostra 6	1785,97	1922,15	1857,53	1884,65
Mínimo	1785,97	1763,95	1829,07	1853,45
Média	1825,85	1874,27	1890,22	1900,96
Máximo	1872,49	1922,15	1946,78	1966,52
Desvio padrão	27,54	57,22	46,08	41,68
Coefficiente de variação	1,19%	3,11%	2,56%	2,41%

Fonte: Resultados laboratoriais da autora obtidos com base na ASTM C1754 (ASTM, 2012).

Índices de vazios ( $I_v$ ) dos concretos no estado endurecido.

	<b>Grupo 0</b>	<b>Grupo 5</b>	<b>Grupo 7,5</b>	<b>Grupo 10</b>
Amostra 1	29,72	27,37	27,98	27,57
Amostra 2	29,44	25,99	26,74	24,82
Amostra 3	29,84	25,71	24,59	25,80
Amostra 4	27,38	32,09	29,20	22,58
Amostra 5	30,02	25,90	24,01	26,97
Amostra 6	31,25	24,58	27,60	26,83
Mínimo	27,38	24,58	24,01	22,58
Média	29,61	26,94	26,69	25,76
Máximo	31,25	32,09	29,20	27,57
Desvio padrão	1,26	2,68	2,02	1,84
Coefficiente de variação	3,66%	10,01%	8,24%	7,64%

Fonte: Resultados laboratoriais da autora obtidos com base na ASTM C1754 (ASTM, 2012).

## ANEXO B – RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Resistência à tração na flexão, em MPa, dos concretos produzidos.

	<b>Grupo 0</b>	<b>Grupo 5</b>	<b>Grupo 7,5</b>	<b>Grupo 10</b>
Amostra 1	1,08	1,71	1,71	2,51
Amostra 2	0,97	1,37	1,48	1,77
Amostra 3	0,74	1,25	1,54	1,82
Mínimo	0,74	1,25	1,48	1,77
Média	0,93	1,44	1,58	2,03
Máximo	1,08	1,71	1,71	2,51
Desvio padrão	0,17	0,24	0,12	0,41
Coeficiente de variação	8,66%	16,75%	10,22%	25,77%

Fonte: Resultados laboratoriais da autora obtidos com base na NBR 12142 (ABNT, 2010).

## ANEXO C – COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE

Permeabilidade, em mm/s, dos concretos produzidos.

	Grupo 0	Grupo 5	Grupo 7,5	Grupo 10
Amostra 1	4,32	3,66	3,83	3,65
Amostra 2	4,16	3,82	3,60	3,56
Amostra 3	4,00	4,39	3,44	3,80
Amostra 4	3,69	3,63	3,78	3,44
Amostra 5	3,92	4,08	3,55	3,87
Amostra 6	3,78	3,65	3,51	3,63
Amostra 7	3,60	3,46	3,75	3,52
Amostra 8	3,71	3,23	3,67	3,26
Amostra 9	3,75	3,50	3,55	3,46
Amostra 10	3,70	3,80	3,60	3,55
Amostra 11	4,03	3,46	3,60	3,52
Amostra 12	4,08	4,25	3,43	3,50
Mínimo	3,60	3,23	3,43	3,26
Média	3,90	3,74	3,61	3,56
Máximo	4,32	4,39	3,83	3,87
Desvio padrão	0,22	0,35	0,13	0,16
Coefficiente de variação	5,72%	9,21%	3,50%	4,55%

Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).



## ANEXO D – COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE APÓS SEDIMENTAÇÃO

Permeabilidade média, em mm/s, após os ciclo de deposição de areia.

	Grupo 0	Grupo 5	Grupo 7,5	Grupo 10
Inicial	4,16	3,95	3,62	3,67
1º ciclo	4,13	3,92	3,67	3,64
2º ciclo	4,09	3,83	3,64	3,57
3º ciclo	4,00	3,77	3,60	3,56
4º ciclo	4,01	3,73	3,56	3,51
5º ciclo	3,92	3,74	3,49	3,45
6º ciclo	3,88	3,71	3,54	3,46
7º ciclo	3,84	3,71	3,51	3,52
8º ciclo	3,86	3,67	3,46	3,35
9º ciclo	3,81	3,63	3,48	3,32
10º ciclo	3,76	3,66	3,40	3,32
11º ciclo	3,76	3,56	3,39	3,23
12º ciclo	3,74	3,58	3,40	3,19
13º ciclo	3,68	3,52	3,43	3,18
14º ciclo	3,69	3,53	3,33	3,14
15º ciclo	3,65	3,51	3,30	3,12
16º ciclo	3,63	3,46	3,34	3,08
17º ciclo	3,59	3,45	3,30	3,07
18º ciclo	3,57	3,38	3,24	2,98
19º ciclo	3,58	3,40	3,20	2,91
20º ciclo	3,57	3,39	3,21	2,90

Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).

Permeabilidade média, em mm/s, após os ciclo de deposição de areia e de limpeza.

	Grupo 0	Grupo 5	Grupo 7,5	Grupo 10
Inicial	3,69	3,66	3,40	3,41
1º ciclo	3,49	3,49	3,15	3,24
Limpeza	3,85	3,74	3,44	3,48
2º ciclo	3,67	3,68	3,18	3,15
Limpeza	3,70	3,70	3,43	3,46
3º ciclo	3,62	3,45	3,18	3,10
Limpeza	3,54	3,82	3,60	3,45
4º ciclo	3,65	3,64	3,37	3,22
Limpeza	3,72	3,69	3,42	3,39

Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).

Permeabilidade média, em mm/s, após os ciclo de deposição de argila.

	Grupo 0	Grupo 5	Grupo 7,5	Grupo 10
Inicial	3,80	3,79	3,61	3,64
1º ciclo	3,80	3,82	3,60	3,65
2º ciclo	3,78	3,76	3,57	3,61
3º ciclo	3,79	3,78	3,55	3,61
4º ciclo	3,77	3,74	3,49	3,56
5º ciclo	3,72	3,66	3,49	3,47
6º ciclo	3,76	3,67	3,48	3,46
7º ciclo	3,75	3,64	3,44	3,45
8º ciclo	3,69	3,61	3,44	3,38
9º ciclo	3,72	3,58	3,37	3,34
10º ciclo	3,63	3,59	3,39	3,34
11º ciclo	3,64	3,58	3,32	3,33
12º ciclo	3,58	3,56	3,31	3,32
13º ciclo	3,57	3,49	3,28	3,29
14º ciclo	3,55	3,47	3,30	3,23
15º ciclo	3,53	3,46	3,25	3,19
16º ciclo	3,55	3,43	3,23	3,17
17º ciclo	3,51	3,39	3,19	3,11
18º ciclo	3,50	3,41	3,18	3,11
19º ciclo	3,48	3,38	3,19	3,09
20º ciclo	3,48	3,34	3,12	3,04
Inicial	3,80	3,79	3,61	3,64
Redução	0,32	0,45	0,50	0,60
Redução	8,45%	11,80%	13,79%	16,46%

Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).

Permeabilidade média, em mm/s, após os ciclo de deposição de argila e de limpeza.

Inicial	3,93	3,84	3,54	3,52
1º ciclo	3,65	3,67	3,27	3,27
Limpeza	3,96	3,77	3,59	3,45
2º ciclo	3,73	3,51	3,25	3,01
Limpeza	3,81	3,71	3,50	3,45
3º ciclo	3,53	3,48	3,14	3,04
Limpeza	3,88	3,65	3,55	3,41
4º ciclo	3,63	3,40	3,22	3,02
Limpeza	3,84	3,72	3,56	3,45
Inicial	3,93	3,84	3,54	3,52

Fonte: Resultados laboratoriais da autora com base no método proposto pelo ACI 522R (ACI, 2010).