

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JONATHAN DUARTE OLIVEIRA

**DESEMPENHO DO CONCRETO PERMEÁVEL APÓS ENTUPIMENTO INDUZIDO
E TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO**

**Alegrete
2022**

JONATHAN DUARTE OLIVEIRA

**DESEMPENHO DO CONCRETO PERMEÁVEL APÓS ENTUPIMENTO INDUZIDO
E TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia.

Orientadora: Fernanda Bianchi Pereira da
Costa

**Alegrete
2022**

JONATHAN DUARTE OLIVEIRA

**DESEMPENHO DO CONCRETO PERMEÁVEL APÓS ENTUPIMENTO INDUZIDO E
TÉCNICAS DE MANUTENÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 14 de dezembro de 2022.

Banca examinadora:

Profa. Dra. FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA - UNIPAMPA - Orientadora

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA

Prof. Me. MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MAURICIO SILVEIRA DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/02/2023, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 08:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 11:41, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1046152** e o código CRC **5C3EF2C4**.

RESUMO

O crescimento excessivo dos centros urbanos potencializa a impermeabilização do solo, a qual é responsável pela ocorrência de inundações, provocando a contaminação dos mananciais de abastecimento público. Para amenizar esse problema, será essencial encontrar mecanismos que proporcionem harmonia entre as demandas de desenvolvimento e os aspectos de sustentabilidade, com enfoque nas questões ambientais, econômicas e sanitárias. Dentre as alternativas disponíveis está inserido o concreto permeável, que é um dispositivo que almeja recuperar a aptidão drenante da superfície. Em razão de possuir uma grande quantidade de vazios, o pavimento de concreto permeável apresenta fragilidade ao fenômeno de entupimento, gerando dúvidas quanto à extensão de sua vida útil. Nesse contexto, surge a necessidade de implementar metodologias viáveis de manutenção, as quais detenham capacidade de restaurar significativamente o desempenho original do elemento. Procurando contribuir para a resolução da problemática, a presente pesquisa tem como propósito verificar a variação de performance do concreto permeável quando submetido ao fenômeno de entupimento, além de propor técnicas satisfatórias de limpeza ao pavimento. Em primeiro lugar, confeccionou-se quatro placas de concreto permeável (45x45x20 cm), expostas a diferentes cenários de entupimento/manutenção, sendo realizado o ensaio de taxa de infiltração nas mesmas. Sequencialmente, foram extraídos quatro corpos de prova cilíndricos (10x20 cm) de cada uma das placas fabricadas, os quais serviram para a execução dos ensaios de densidade, porosidade, permeabilidade e resistência à compressão. Em relação aos resultados obtidos, evidenciou-se que o fenômeno de entupimento prejudica a funcionalidade e durabilidade do concreto permeável, tendo em vista que a sua incidência provocou um decréscimo acentuado na capacidade de infiltração da estrutura. No entanto, foi constatado que os métodos de manutenção sugeridos são capazes de amenizar os impactos causados pelo processo de obstrução dos poros, atingindo-se maior eficiência com o procedimento de limpeza com jato de ar comprimido.

Palavras-Chave: Concreto permeável; Fenômeno de entupimento; Manutenção.

ABSTRACT

The excessive growth of urban centers enhances soil sealing, which is responsible for the occurrence of floods, causing contamination of public supply sources. To mitigate this problem, it will be essential to find mechanisms that provide harmony between development demands and sustainability aspects, with a focus on environmental, economic and health issues. Among the available alternatives is permeable concrete, which is a device that aims to recover the draining ability of the surface. Due to having a large amount of voids, the permeable concrete pavement is fragile to the phenomenon of clogging, raising doubts about the extension of its useful life. In this context, the need arises to implement viable maintenance methodologies, which have the capacity to significantly restore the element's original performance. Seeking to contribute to the resolution of the problem, the present research aims to verify the performance variation of permeable concrete when subjected to the phenomenon of clogging, in addition to proposing satisfactory techniques for cleaning the pavement. Firstly, four permeable concrete plates (45x45x20 cm) were made, exposed to different clogging/maintenance scenarios, and the infiltration rate test was carried out on them. Sequentially, four cylindrical specimens (10x20 cm) were extracted from each of the manufactured plates, which served to perform the density, porosity, permeability and compressive strength tests. Regarding the results obtained, it was evident that the phenomenon of clogging impairs the functionality and durability of permeable concrete, considering that its incidence caused a sharp decrease in the infiltration capacity of the structure. However, it was found that the suggested maintenance methods are capable of mitigating the impacts caused by the process of pore obstruction, achieving greater efficiency with the cleaning procedure with a jet of compressed air.

Keywords: Pervious concrete; Clogging phenomenon; Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Anel de infiltração.....	14
Figura 2 – Compactação do concreto permeável com rolo	18
Figura 3 – Resultados de entupimento em sedimentos de areia, argila e areia + argila	19
Figura 4 – Calha com inclinação ajustável	20
Figura 5 – Lavagem com água de alta pressão	21
Figura 6 – Limpeza com jato de ar comprimido.....	22
Figura 7 – Brita 0.....	23
Figura 8 – Curva granulométrica do agregado graúdo, incluindo os limites normativos	24
Figura 9 – Fluxograma do estudo.....	26
Figura 10 – Verificação táctil visual da mistura	27
Figura 11 – Placa de concreto permeável (a) e rolo para compactação (b).....	28
Figura 12 – Curva granulométrica da areia, incluindo os limites normativos.....	29
Figura 13 – Adição de areia na placa para entupimento induzido.....	29
Figura 14 – Manutenção: com compressor de ar (a) e com lava jato (b)	30
Figura 15 – Fixação do anel de infiltração plástico.....	31
Figura 16 – Extração de corpos de prova cilíndricos.....	32
Figura 17 – Obtenção da massa submersa do corpo de prova.....	33
Figura 18 – Permeâmetro de carga variável (a) e revestimento da amostra (b).	34
Figura 19 – Capeamento dos corpos de prova para teste de compressão axial.....	35
Figura 20 – Taxa de infiltração vs. Número de ciclos de entupimento	37
Figura 21 – Densidade vs. Porosidade	38
Figura 22 – Porosidade média	39
Figura 23 – Permeabilidade vs. Porosidade.....	40
Figura 24 – Porosidade vertical do corpo de prova	41
Figura 25 – Permeabilidade média.....	42
Figura 26 – Resistência à compressão vs. Porosidade.....	43
Figura 27 – Resistência à compressão média.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa de urbanização	10
Tabela 2 – Requisitos do revestimento permeável.....	15
Tabela 3 – Ensaio físicos, mecânicos e químicos do CP V-ARI.....	24
Tabela 4 – Médias e desvio padrão (SD) das placas de concreto permeável (taxa de infiltração).....	37
Tabela 5 – Média e desvio padrão das amostras (porosidade).....	39
Tabela 6 – Média e desvio padrão das amostras (permeabilidade)	41
Tabela 7 – Valores médios e desvio padrão (SD) de resistência à compressão.....	43

LISTA DE SIGLAS

ACI - American Concrete Institute

ASTM - American Society for Testing And Materials

NBR - Norma Brasileira

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LAGETEC - Laboratório de Geotécnica e Prospecção

US EPA - United States Environmental Protection Agency

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa.....	11
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo geral....	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	12
2	CONCRETO PERMEÁVEL.....	12
2.1	Características hidráulicas.....	13
2.2	Características mecânicas....	14
2.3	Vantagens e desvantagens....	16
2.4	Compactação.....	17
2.5	Entupimento....	19
2.6	Manutenção....	21
3	MATERIAS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais	23
3.1.1	Agregado graúdo	23
3.1.2	Cimento Portland	24
3.1.3	Água ...	25
3.1.4	Aditivo ...	25
3.2	Métodos.....	25
3.2.1	Determinação do traço	27
3.2.2	Moldagem, compactação e cura ...	27
3.2.3	Entupimento induzido	28
3.2.4	Técnicas de manutenção	30
3.2.5	Ensaio de taxa de infiltração realizado na placa ...	30
3.2.6	Ensaio realizado em corpos de prova extraídos ...	31

3.2.6.1	Ensaio de densidade.....	32
3.2.6.2	Ensaio de porosidade	32
3.2.6.3	Ensaio de permeabilidade	33
3.2.6.4	Ensaio de resistência à compressão.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1	Taxa de infiltração	36
4.2	Densidade vs. porosidade.....	38
4.3	Permeabilidade vs. porosidade.....	39
4.4	Resistência à compressão vs. porosidade....	42
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil está sofrendo um processo intenso de urbanização, o qual é responsável pela impermeabilização do solo e crescimento do escoamento pluvial que, conseqüentemente, estimulam o surgimento de problemas ambientais, econômicos e sanitários. Conforme Tucci (1997), as decorrências desse processo afetam todo o aparelhamento urbano relativo a recursos hídricos, compreendendo abastecimento de água, transporte e tratamento de esgotos cloacal e pluvial.

Os dados disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2010), indicam que no decorrer das últimas décadas, ocorreu um aumento expressivo da população urbana no país. Com o auxílio da Tabela 1, pode-se observar que entre os anos de 1940 a 2010 (versão mais recente do censo demográfico) houve uma elevação de 53,12 % na taxa de urbanização.

Tabela 1 – Taxa de urbanização.

Período	Taxa de urbanização (%)
1940	31,24
1950	36,16
1960	44,67
1970	55,92
1980	67,59
1991	75,59
2000	81,23
2010	84,36

Fonte: IBGE (2010).

Para suportar o acelerado crescimento populacional, as metrópoles precisam expandir-se para as áreas de mananciais de abastecimento público, resultando em um agravamento do problema de gerenciamento das águas urbanas (TUCCI; BERTONI, 2003). Essa expansão ocorre, na maior parte dos casos, de modo desordenado, sem o planejamento necessário para garantir uma adequada ocupação do solo.

De acordo com Acioli (2005), os principais malefícios decorrentes da urbanização são: amplificação no volume do escoamento superficial e na intensidade das inundações; diminuição da umidade do solo, que ocasiona uma redução do lençol freático; limitação do escoamento de base dos rios. Outra adversidade significativa, é

a ineficiência na execução da coleta e deposição final dos resíduos sólidos, que aumenta a carga de poluentes transportada através do escoamento superficial.

No caso dos grandes centros urbanos, será fundamental encontrar um equilíbrio entre as necessidades de desenvolvimento e os aspectos de sustentabilidade. Para que isso ocorra, recomenda-se a elaboração de mecanismos para minimizar o escoamento superficial ou materiais alternativos que beneficiem o processo de infiltração. Nessa conjuntura está inserido o concreto permeável, que é um dispositivo que visa restaurar a capacidade de infiltração do solo.

1.1 Justificativa

Nos países em desenvolvimento, onde os empecilhos relativos à drenagem urbana são mais acentuados, os sistemas tradicionais de drenagem se tornaram ineficientes, gerando inúmeros transtornos para a população. Baseado nisso, intensificou-se a procura por soluções econômicas e inovadoras, que proporcionem atributos capazes de mitigar os danos gerados pela impermeabilização do solo.

Os pavimentos de concreto permeável funcionam como reservatórios e viabilizam a infiltração da água no subleito, de forma que, cooperam positivamente no funcionamento do sistema de drenagem (LAMB, 2014). A estrutura permeável ainda não possui uma vasta aplicação no território brasileiro, em razão da escassez de normas e procedimentos técnicos referentes ao material.

Segundo Polastre e Santos (2006), esse modelo de concreto apresenta diversos vazios interligados, que asseguram uma elevada taxa de permeabilidade ao pavimento. Em contrapartida, a grande quantidade de vazios também promove redução na resistência mecânica do material, assim, impossibilitando a sua implementação em circunstâncias de tráfego pesado de veículos.

Em virtude de abranger macro poros na composição, o pavimento de concreto permeável manifesta vulnerabilidade ao fenômeno de entupimento, causando incertezas quanto ao seu comportamento a longo prazo. Para superar esse obstáculo, será fundamental estabelecer técnicas viáveis de manutenção, as quais estejam aptas a propiciar uma recuperação considerável da performance do material.

1.2 Objetivos

Nesta seção são exibidos os objetivos propostos para o presente trabalho, sendo subdivididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Este estudo tem como escopo avaliar a variação, provocada através do fenômeno de entupimento, do desempenho hidráulico e mecânico do concreto permeável, bem como, propor metodologias para efetuar uma limpeza satisfatória do pavimento.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Induzir a ocorrência de entupimento em placas de concreto permeável, simulando sua exposição à natureza mediante uma concentração adequada de sedimentos;
- b) Averiguar o desempenho do elemento, em termos de capacidade de infiltração, quando submetido a diferentes ciclos de entupimento;
- c) Comparar estratégias eficientes de manutenção para a estrutura de concreto permeável, com a finalidade de contribuir para a extensão da sua vida útil;
- d) Avaliar, em termos de porosidade, permeabilidade e resistência à compressão, corpos de prova extraídos da placa após o fenômeno de entupimento e manutenção;
- e) Comparar os resultados obtidos nos ensaios implementados, relacionando-os com a performance de uma placa padrão desobstruída.

2 CONCRETO PERMEÁVEL

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos pertinentes ao concreto permeável, com amparo de autores e normas relacionadas ao tema pesquisado. Posto isto, os itens a seguir mostram um estudo detalhado do material, incluindo análises sobre suas características hidráulicas e mecânicas, vantagens e desvantagens, metodologia de compactação, fenômeno de entupimento e técnicas de manutenção. Conseqüentemente, este capítulo tem como intuito fornecer, de forma conceitual, a compreensão das variáveis propostas neste trabalho.

2.1 Características hidráulicas

O concreto permeável é confeccionado com pouca ou nenhuma porção de agregado miúdo (areia) na sua composição, de maneira que proporciona uma elevada quantidade de poros interligados para a estrutura (HASELBACH; VALAVALA; MONTES, 2006). Tal característica dispõe ao elemento uma taxa satisfatória de permeabilidade e, através disso, permite a percolação da água da chuva até os reservatórios subterrâneos.

Schwetz *et al.* (2015) relatam que o índice de vazios varia, normalmente, na faixa de 15-25 % nesse tipo de concreto, assim, tornando-o um material poroso. Dependendo da forma dos agregados utilizados e do método de compactação executado, é possível alcançar taxas de permeabilidade entre 0,2 a 1,0 cm/s que, na maioria das vezes, são capazes de absorver tanto a chuva direta, quanto o escoamento superficial (HASELBACH; VALAVALA; MONTES, 2006).

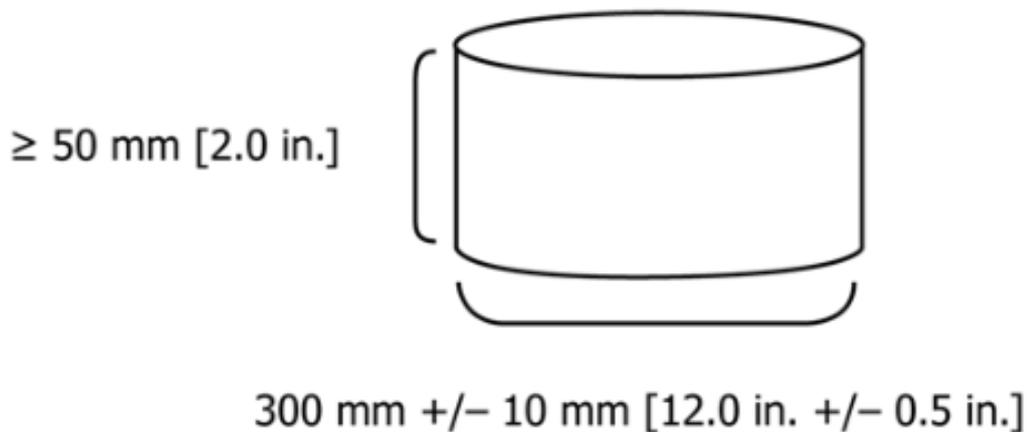
De acordo com Neithalath (2004), a permeabilidade não é influenciada exclusivamente pela porosidade do concreto permeável, tendo em vista que a conectividade entre os poros é outro fator imprescindível para o eficiente funcionamento do sistema. No caso de conexão ineficaz entre os poros, o transporte da água, por intermédio dos mesmos, acaba sendo extremamente prejudicado.

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade (cm/s), emprega-se ensaios similares aos realizados em solos, como o permeâmetro de carga constante ou variável. O ensaio de carga constante é recomendado para casos de alta permeabilidade, porém para elementos com permeabilidade pequena deve-se adotar

o permeâmetro de carga variável, pelo fato de apresentar maior precisão nessa situação (LAGETEC, 2016).

O ensaio proposto pela norma ASTM C1701 (2009), viabiliza a obtenção da taxa de infiltração de água (mm/h) do pavimento, com o auxílio de um anel de infiltração inserido sobre a superfície, que contém altura mínima de 50 mm e diâmetro de 300 +/- 10 mm, conforme ilustrado na Figura 1. Esse ensaio é fundamental para a estimativa, no decorrer do tempo, da diminuição da qualidade de infiltração do sistema permeável, acarretada pelo fenômeno de entupimento dos poros.

Figura 1 – Anel de infiltração.



Fonte: ASTM C1701 (2017).

Outro aspecto relevante, é a influência da variação da porosidade vertical nos índices de infiltração e permeabilidade de corpos de prova de concreto permeável. Quando as amostras são bastante compactadas no topo, ocorre aglomeração do agregado com a pasta de cimento na região e, decorrente disso, há uma tendência de limitação da capacidade de infiltração (COSTA, 2019).

2.2 Características mecânicas

O concreto permeável atinge valores inferiores de resistência, quando contrastado com o concreto convencional, visto que apresenta uma porosidade elevada. O *American Concrete Institute* (ACI) (2006) menciona que as resistências de compressão da estrutura permeável, costumeiramente, variam entre 2,8 a 28 MPa. Por causa disso, seu uso é restringido a locais de tráfego leve como, por exemplo, estacionamentos e ciclovias.

As resistências à compressão e à tração na flexão são inversamente proporcionais ao volume de vazios contido no elemento, isto é, quanto maior o volume de vazios, menor será a resistência mecânica (BATEZINI, 2013). Em virtude disso, necessita-se encontrar um equilíbrio entre as propriedades hidráulicas e mecânicas do material, com a intenção de garantir um bom desempenho nas suas atribuições.

As características mecânicas do concreto permeável dependem da relação agregado/cimento, da relação água/cimento, do nível de compactação e do tipo de agregado aplicado (ACI, 2006). Vale salientar que, a relação água/cimento deve ser manejada com cuidado, porque a falta ou excesso de água provocam impactos nocivos para a mistura.

A norma NBR 16416 (2015), a qual trata das exigências e procedimentos referentes aos pavimentos permeáveis de concreto, estipula os requisitos de espessura mínima e resistência mecânica do revestimento permeável, através da Tabela 2:

Tabela 2 – Requisitos do revestimento permeável.

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60	$\geq 35^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 20^a$	
	Tráfego leve	80		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 2^b$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60	$\geq 1^c$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100	$\geq 2^c$	

^a determinação da resistência à compressão, conforme na ABNT NBR 9781.

^b determinação da resistência à flexão, conforme na ABNT NBR 15805.

^c determinação da resistência à tração na flexão, conforme na ABNT NBR 12142.

Fonte: NBR 16416 (2015).

2.3 Vantagens e desvantagens

Os pavimentos de concreto permeável aplicados na zona urbana, possuem a capacidade de disponibilizar diversos benefícios para a população. De acordo com Henderson (2012), tais vantagens abrangem três setores principais, que são o meio ambiente, a sociedade e a economia.

A estrutura permeável minimiza possíveis prejuízos ambientais, pois sua capacidade de absorção ocasiona efeitos mínimos ou nulos no ciclo natural da água. A redução, ou inúmeras vezes, a eliminação do escoamento superficial em regiões pavimentadas com concreto permeável, em comparação ao pavimento de concreto convencional, simboliza um importante progresso para a preservação do meio ambiente (HENDERSON, 2012).

A estrutura aberta do concreto permeável gera uma diferença no intervalo de chegada e de reflexão das ondas sonoras, as quais são derivadas da circulação dos veículos sobre o pavimento. Consequentemente, essa diferença diminui o nível da intensidade do ruído, assim, fazendo com que o revestimento absorva uma parcela do ruído provocado pelo tráfego (OLEK *et al.*, 2003).

Yang e Jiang (2003) afirmam que durante os dias chuvosos, não ocorre a formação de poças d'água no pavimento permeável, visto que o mesmo possui, por meio de seus poros, aptidão para drenar o volume precipitado. Essa virtude reduz os riscos de fenômenos de aquaplanagem e spray, potencializando a segurança dos usuários no seu deslocamento.

O pavimento asfáltico tradicional possui enorme capacidade de armazenamento de calor na sua superfície, de forma que, promove o surgimento do efeito de ilha de calor urbana, o qual é responsável pelo aumento demasiado da temperatura nos grandes municípios. Neste seguimento, os pavimentos de concreto permeável armazenam menos energia que os sistemas tradicionais, contribuindo na mitigação da ilha de calor urbana (KEVERN; HASELBACH; SCHAEFER, 2012).

O emprego da estrutura permeável permite a redução da necessidade de grandes obras de drenagem, devido a habilidade desse concreto em infiltrar as águas pluviais no solo, proporcionando melhorias ambientais e econômicas para a zona urbana (HOLTZ, 2011). Os custos de construção e manutenção podem ser minimizados, pois este pavimento tem potencial para substituir elementos de drenagem usuais como, pontos de retenção, valas e tubulações.

Apesar das inúmeras qualidades mencionadas acima, a implementação de pavimentos de concreto permeável engloba algumas desvantagens consideráveis. Dentre elas, é possível citar a limitação nos índices de resistência mecânica e o risco de futuros entupimentos do sistema.

A redução dos valores de resistência mecânica, torna-se um fator restritivo para a aplicação do concreto permeável em pavimentos submetidos a cargas elevadas. Conforme Pansera, Pimenta e Andrade (2016), o mesmo pode ser aplicado somente em espaços de tráfego leve ou calçadas e, além disso, debilita a velocidade de operação do trânsito.

Como o concreto permeável contém grandes vazios, o decréscimo de sua permeabilidade deriva do acúmulo de sedimentos, que são transportados através da água da chuva e do vento (SANDOVAL *et al.*, 2020). Tal redução está relacionada com as particularidades de cada sedimento, podendo haver diferentes graus de entupimento.

2.4 Compactação

As metodologias clássicas de adensamento são efetivas em concretos convencionais, no entanto, não recomenda-se suas aplicações em misturas de concreto permeável, levando em consideração que esses métodos podem não ser representativos *in loco*. Segundo Haselbach e Freeman (2006), a utilização da haste de adensamento como ferramenta de compactação, mostrou-se inapropriada para corpos-de-prova de concreto permeável.

O ACI (2006) propõe o emprego de um rolo (Figura 2) para a compactação do concreto permeável *in situ*, o qual deve ser aplicado em camada única, porque o material possui *slump*, aproximadamente, igual à zero. Com o uso do rolo, é viável atingir um teor satisfatório de compactação, sem deteriorar as propriedades hidráulicas do pavimento (SCHWETZ *et al.*, 2015).

O rolo oferece uma forte ligação entre os agregados e a pasta de cimento e, também, fornece suavidade para a superfície do material. Ele precisa ter largura adequada para a correta compactação das formas e conceder uma força vertical mínima de 10 psi (0,07 MPa) (ACI, 2006).

Para efetuar uma representação prática da estrutura permeável, aconselha-se moldar placas compactadas com rolo e, a partir delas, realizar a extração de amostras cilíndricas (COSTA, 2019). Essas amostras possibilitam a execução de uma análise minuciosa referente aos desempenhos hidráulicos e mecânicos do material. Contudo, para circunstâncias laboratoriais, Chandrappa e Biligiri (2016) mencionam que durante a confecção de corpos de prova cilíndricos tradicionais, a melhor alternativa para a sua compactação é a aplicação do soquete Proctor em duas camadas, distribuindo vinte golpes por camada.

Figura 2 – Compactação do concreto permeável com rolo.



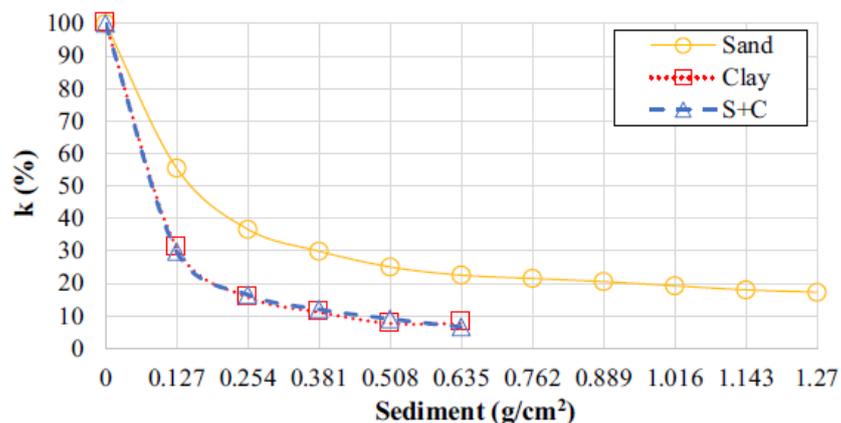
Fonte: ACI (2006).

2.5 Entupimento

Pelo fato de possuir diversos poros interligados, há a preocupação de que a estrutura permeável fique entupida, por intermédio, de sedimentos que são transportados geralmente durante as precipitações. Sandoval *et al.* (2020) relatam que esses sedimentos podem ser partículas de areia, silte ou argila, que acabam prejudicando a funcionalidade e durabilidade do concreto permeável ao decorrer do tempo.

No quesito diminuição de permeabilidade, os sedimentos finos (argilas) são mais nocivos que os sedimentos grossos (areias), conforme delineado na Figura 3 (SANDOVAL *et al.*, 2020). Nas regiões superiores da estrutura, alojam-se as maiores partículas, enquanto as menores são conduzidas para as camadas mais profundas. Para avaliar o efeito de entupimento, os autores fixaram uma concentração de sedimentos equivalente a 1,27 g/cm² para ambos os solos, a qual representa 20 anos de exposição da estrutura a intempéries, sendo dividida em dez porções de mesma quantidade. Essas porções foram adicionadas, de maneira sequencial, em placas de concreto permeável, com o propósito de avaliar a queda gradual de suas performances hidráulicas, em relação a uma permeabilidade inicial de 5,75 mm/s, através do ensaio de taxa de infiltração. Ao longo do processo de obstrução dos poros, houve um declínio considerável da aptidão hidráulica do material, mesmo assim, conservou-se um valor final razoável de permeabilidade. O traço unitário implementado no estudo foi de 1:3,26 (cimento:agregado) com relação água/cimento de 0,34, atingindo uma porosidade de 26,57 %.

Figura 3 – Resultados de entupimento em sedimentos de areia, argila e areia + argila.



Fonte: Sandoval *et al.* (2020).

Haselbach, Valavala e Montes (2006) realizaram uma investigação direcionada aos impactos causados nos sistemas de concreto permeável quando obstruídos por partículas de areia. Na tentativa de simular condições extremas de entupimento, os pesquisadores propuseram um experimento prático, que consistia no encaixe do bloco permeável, completamente coberto por material arenoso, em uma calha com inclinação ajustável (Figura 4), a qual era irrigada com uma mangueira perfurada. No decorrer do estudo, observou-se a ocorrência de escoamento superficial somente para intensidades severas de precipitação, que eram muito superiores aos eventos de chuva esperados na região geográfica averiguada.

Figura 4 – Calha com inclinação ajustável.



Fonte: Haselbach, Valavala e Montes (2006).

Em relação ao processo de obstrução dos poros, as ações biológicas também causam danos na atuação do concreto permeável. O entupimento biológico é caracterizado pela proliferação de algas e bactérias no interior do material e, além disso, por penetração de detritos de árvores no meio poroso (SINGH; SAMPATH; BILIGIRI, 2020).

De acordo com Lamb (2014), o entupimento é capaz de fazer o material perder, de modo lento e progressivo, sua aptidão em infiltrar águas pluviais, tendo em vista que a função drenante do sistema declina. Logo, esse fenômeno influencia frontalmente a longevidade do pavimento.

2.6 Manutenção

Em razão de possuir uma estrutura porosa, há a possibilidade de ocorrer a colmatação dos poros no concreto permeável, tornando-se necessário a realização de manutenções periódicas. Kuang *et al.* (2007) sugerem que em intervalos de seis meses, sejam executadas técnicas de manutenção no pavimento.

Para a restauração da capacidade permeável do material, existem métodos eficientes de limpeza, os quais são: varrimento da superfície, lavagem com água de alta pressão e limpeza com jato de ar comprimido (SINGH; SAMPATH; BILIGIRI, 2020). A efetividade de cada mecanismo de limpeza depende de vários fatores, tais como a origem dos sedimentos causadores do entupimento e as condições climáticas do ambiente circundante.

Conforme Sandoval *et al.* (2020), o melhor método para a limpeza dos poros obstruídos com argila é a lavagem com água de alta pressão (Figura 5), alcançando uma recuperação de 8,35 % de permeabilidade. A competência da lavagem com água pode ser atribuída ao tamanho dos grãos de argila, que são expelidos através da alta pressão.

Figura 5 – Lavagem com água de alta pressão.



Fonte: Sandoval *et al.* (2020).

No caso de entupimento ocasionado por sedimentos de areia, conclui-se que a utilização do procedimento de limpeza com jato de ar comprimido (Figura 6) assegura o melhor índice de restauração de permeabilidade, com resultado de 21,31 % (SANDOVAL *et al.*, 2020). O compressor de ar facilita a desobstrução de elementos que estiveram em contato com solos arenosos, pois consegue remover as partículas de areia retidas nos poros internos e superficiais da estrutura.

Figura 6 – Limpeza com jato de ar comprimido.



Fonte: Sandoval *et al.* (2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Ao longo da seção 3.1, são apresentados todos os materiais usados nesta pesquisa, enquanto os procedimentos experimentais estão relatados na seção 3.2 deste capítulo.

3.1 Materiais

Nesta seção são descritos os materiais empregados na confecção das placas de concreto permeável, isto é, agregado graúdo, cimento Portland, água e aditivo modificador de reologia.

3.1.1 Agregado graúdo

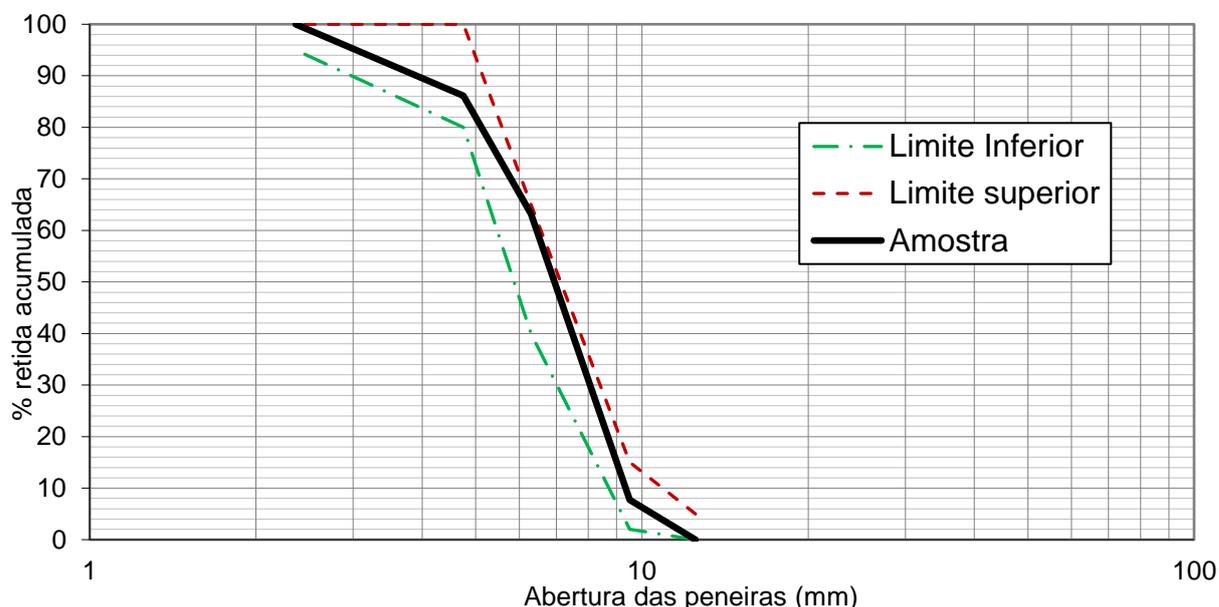
Para a fabricação do concreto permeável, o agregado graúdo utilizado foi a brita 0 (Figura 7), com diâmetro máximo nominal de 12,5 mm e módulo de finura igual à 5,85, determinados conforme a NBR NM 248 (2003). Em situações de concretagem, a fração do material inferior a 2,36 mm foi removida mediante peneiramento, pelo fato de ser considerada friável. A Figura 8 ilustra a curva granulométrica do agregado, em companhia com os limites normativos prescritos na NBR 7211 (2005). As propriedades de massa específica e absorção de água, estabelecidas em concordância com a NBR NM 53 (2009), possuem valor de 2,79 g/cm³ e 0,56 %, respectivamente.

Figura 7 – Brita 0.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 8 – Curva granulométrica do agregado graúdo, incluindo os limites normativos.



Fonte: Elaboração própria (2022).

3.1.2 Cimento Portland

O cimento Portland CP V-ARI foi empregado no desenvolvimento desse trabalho, porque oferece elevada resistência nas idades iniciais. Lamb (2014) afirma que o CP V-ARI viabiliza uma rápida desforma da estrutura, em razão de seu tempo de cura reduzido. Essa agilidade na desforma é essencial, levando em consideração que possibilita maior rotatividade no estoque e alta velocidade de produção das peças. A caracterização do aglomerante selecionado, encontra-se incorporada na Tabela 3.

Tabela 3 – Ensaios físicos, mecânicos e químicos do CP V-ARI.

FÍSICOS		
Ensaio	Resultado	Exigência
Área específica - Blaine (cm ² /g)	4613	≥ 3000
Massa específica (g/cm ³)	3,00	Não aplicável
Índice de finura - n ^o 200 (%)	0,13	≤ 6,00
Resíduo na peneira - #325 (%)	1,12	Não aplicável
Água de consistência normal (%)	29,20	Não aplicável
Início de pega (min)	151	≥ 60
Fim de pega (min)	211	≤ 600
Expansibilidade à quente (mm)	0,00	≤ 5,00

(CONTINUA)

(CONTINUAÇÃO)

MECÂNICOS - NBR 7215/96		
Ensaio	Resultado	Exigência
Resistência à compressão - 1 dia (MPa)	28,50	14,00
Resistência à compressão - 3 dias (MPa)	43,50	24,00
Resistência à compressão - 7 dias (MPa)	48,70	34,00
Resistência à compressão - 28 dias (MPa)	57,90	Não aplicável
QUÍMICOS		
Ensaio	Resultado	Exigência
Resíduo insolúvel - RI (%)	0,74	≤ 1,00
Perda ao fogo - PF(%)	4,13	≤ 4,50
Óxido de magnésio - MgO (%)	1,28	≤ 6,50
Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	3,21	≤ 4,50
Anidrido carbônico - CO ₂ (%)	2,87	≤ 3,00

(CONCLUSÃO)

Fonte: Informações concedidas pelo fabricante (2017).

3.1.3 Água

Durante a execução da concretagem, foi utilizada a água fornecida pela rede de abastecimento local, a qual é considerada potável. Na cidade de Alegrete/RS, a sua distribuição é feita pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

3.1.4 Aditivo

O aditivo escolhido para incorporação na mistura de concreto permeável foi o V-MAR® 3, que tem como função melhorar a reologia do concreto, favorecendo sua aplicação e acabamento.

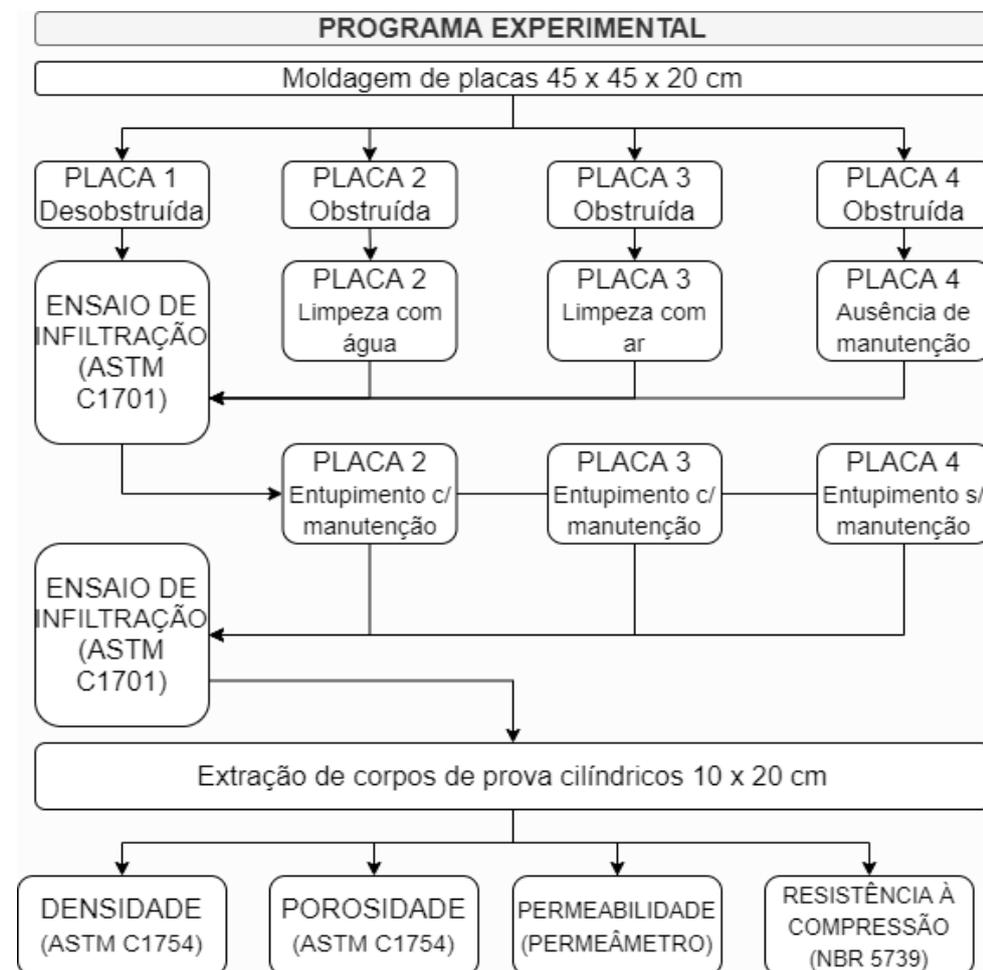
3.2 Métodos

O fluxograma ilustrado na Figura 9 apresenta as etapas constituintes do estudo, visando promover o completo entendimento da estratégia adotada. Em primeiro lugar, foram moldadas quatro placas de concreto permeável, mantendo-se uma delas desobstruída (Placa 1), de modo a estabelecer valores de referência, enquanto as outras três sofreram processo de colmatação mediante a inserção de areia fina (Placas 2, 3 e 4). Sequencialmente, os três elementos obstruídos foram submetidos a cenários distintos, sendo executada lavagem com água de alta pressão na Placa 2,

limpeza com jato de ar comprimido na Placa 3 e ausência de manutenção na Placa 4. Em seguida, foi aplicado o ensaio de taxa de infiltração em todas as placas fabricadas, assim, oportunizando a realização de análise aprofundada sobre os efeitos ocasionados pelo fenômeno de entupimento. Posteriormente, repetiu-se o ciclo de entupimento/manutenção nas Placas 2, 3 e 4. Logo após, o ensaio de taxa de infiltração foi novamente exercido nos elementos colmatados, com o propósito de avaliar a eficiência das técnicas de manutenção depois da adição de uma nova concentração de sedimentos. Por fim, foram extraídos quatro corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro x 20 cm de altura) de cada uma das placas confeccionadas, os quais serviram para a efetuação dos ensaios de densidade, porosidade, permeabilidade e resistência à compressão.

Nos próximos itens são detalhadas as metodologias de moldagem, compactação, cura das amostras, entupimento induzido e manutenção, bem como, o traço adotado.

Figura 9 – Fluxograma do estudo.



Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.1 Determinação do traço

Durante a definição do traço adequado para as misturas de concreto permeável, levou-se em consideração a dosagem desenvolvida por Costa *et al.* (2018), que propõem a aplicação de um traço unitário de 1:4 (cimento:agregado) e uma relação água/cimento de 0,26. Com essas proporções, estima-se uma porosidade de 25 %.

3.2.2 Moldagem, compactação e cura

A confecção do concreto permeável foi executada no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMAC), em uma betoneira convencional. Inicialmente, foi inserido o agregado graúdo com uma pequena parcela de água, para umedecer a sua superfície, com o intuito de garantir melhor aderência entre os agregados e a pasta de cimento. Após ligeira mistura desses materiais, foram adicionados o cimento, o restante da água e, por último, o aditivo na betoneira. Na sequência, o concreto permeável foi misturado, em torno de, 5 minutos. Depois do término do tempo de mistura, foi efetuada uma verificação táctil visual, que consiste em pressionar uma porção da mistura com a mão e examinar se há a formação de aglomeração de partículas, como exemplificado na Figura 10, em concordância com o estudo realizado por Batezini (2013).

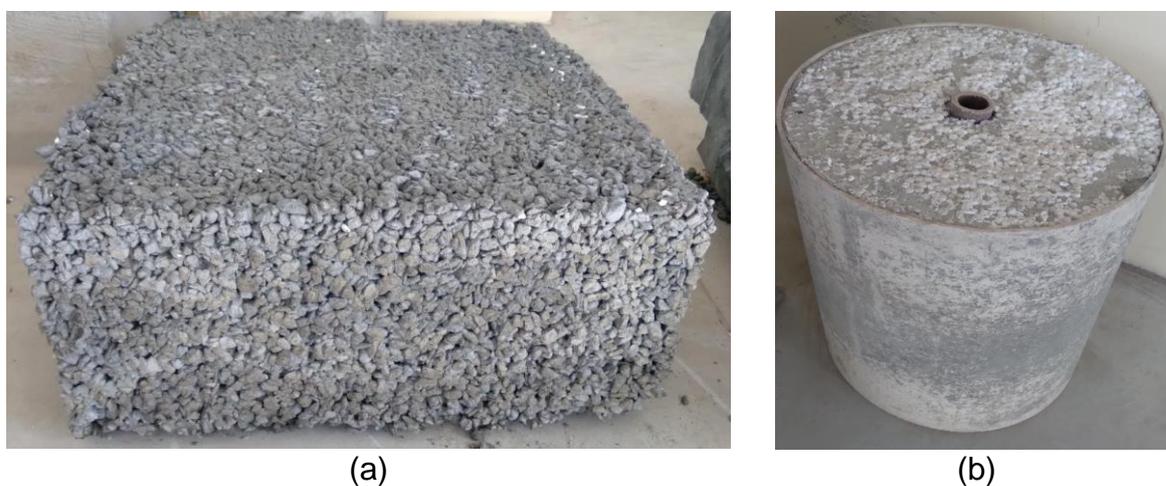
Figura 10 – Verificação táctil visual da mistura.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Para a análise desejada, um conjunto de placas de concreto permeável (45 cm de comprimento x 45 cm de largura x 20 cm de altura) foram moldadas (Figura 11a). A compactação das placas foi realizada com um rolo de 50 kg (Figura 11b), em uma única camada. No tocante ao número de passadas do rolo, a quantidade necessária foi condicionada ao grau de dificuldade enfrentado para acomodar a massa de concreto no recipiente selecionado. Os elementos foram desmoldados após 48 horas e curados por 28 dias em temperatura ambiente e umidade relativa de 50 +/- 5 %, conforme descrito por Costa (2019).

Figura 11 – Placa de concreto permeável (a) e rolo para compactação (b).

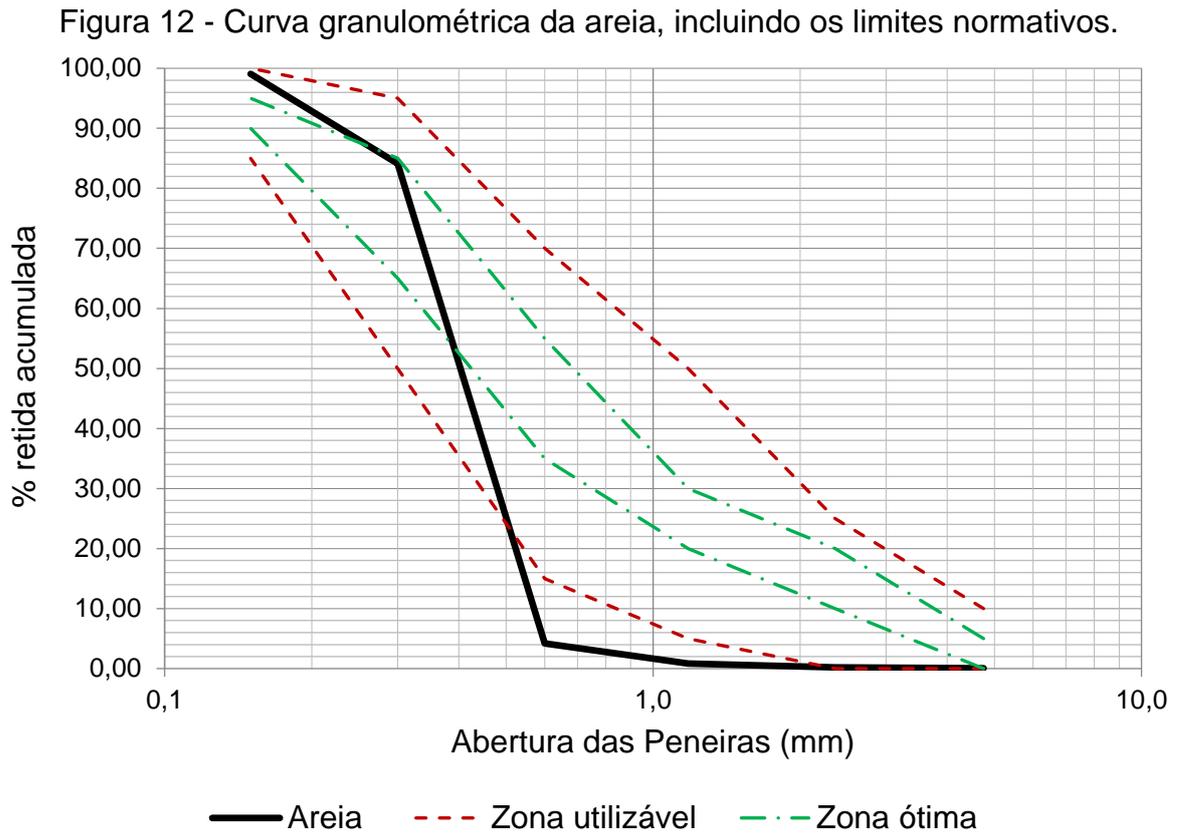


Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.3 Entupimento induzido

Para verificar o efeito gerado pelo fenômeno de entupimento, foi implementada uma adaptação da metodologia proposta por Sandoval *et. al* (2020), que consiste na adição, em placas de concreto permeável, de uma concentração de 1,27 g/cm² de sedimentos de areia, a qual foi fixada mediante as considerações concedidas pela *United States Environmental Protection Agency* (US EPA), com a intenção de simular 20 anos de exposição a natureza. O material empregado no procedimento foi a areia fina proveniente do rio Ibicuí, que contém diâmetro máximo nominal de 0,6 mm e módulo de finura igual à 1,93. A curva granulométrica desse agregado está inserida na Figura 12, juntamente com os intervalos estabelecidos na NBR 7211 (2005). A concentração sedimentar foi introduzida em toda a extensão superior da estrutura (Figura 13), através de movimentos sincronizados com a peneira de 4,75 mm, com o

propósito de garantir uma boa distribuição da mesma nos poros. A partir disso, foi possível comparar a variação, em relação a uma placa padrão desobstruída, dos seus desempenhos hidráulicos e mecânicos. Cabe lembrar que o ciclo de entupimento foi realizado duas vezes, intermediado pelas técnicas de manutenção e pelo ensaio de infiltração (descrito no item 3.2.5), pretendendo visualizar o comportamento do elemento em diferentes estágios de colmatação.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 13 – Adição de areia na placa para entupimento induzido.



Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.4 Técnicas de manutenção

Logo após a inserção do material arenoso, a fim de amenizar os impactos originados, as placas de concreto permeável foram submetidas aos métodos de limpeza com jato de ar comprimido e lavagem com água de alta pressão, tornando viável estimar o teor de reabilitação gerado por cada uma das estratégias adotadas. A limpeza com jato de ar comprimido foi executada com um compressor de ar (Figura 14a), enquanto a lavagem com água de alta pressão precisou do emprego de um lava jato (Figura 14b).

Figura 14 – Manutenção: com compressor de ar (a) e com lava jato (b).



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.5 Ensaio de taxa de infiltração realizado na placa

A taxa de infiltração foi medida nas placas de concreto permeável, na idade de 7 dias, atendendo as recomendações descritas pela norma ASTM C1701 (2009). Para a correta efetuação do ensaio, foi posicionado um anel de infiltração plástico (300 mm de diâmetro x 50 mm de altura) no centro da placa, o qual teve sua borda inferior fixada na superfície da placa com massa de calafetar (Figura 15). Sequencialmente, foi realizado um teste de pré-molhagem com 3,6 kg de água, conservando-se uma coluna d'água padrão no interior do anel. A contagem do tempo começou no momento em que a água atingiu a superfície da placa e terminou quando ocorreu o completo

desaparecimento da água na superfície do concreto permeável. Essa mensuração de tempo serviu para estabelecer a quantidade de água que foi empregada no ensaio, quando o tempo de pré-molhagem é menor que 30 segundos, utiliza-se um total de 18 kg de água no teste, caso contrário, segue-se usando uma porção de 3,6 kg. O teste foi executado três vezes, com a pretensão de coletar um tempo médio para a determinação da taxa de infiltração. A taxa de infiltração (I) é encontrada, por meio, da Equação 1:

$$I(mm/h) = \frac{K * M}{D^2 * t} \quad (1)$$

Onde:

K = fator de conversão dos dados na unidade SI, com valor de 4583666000;

M = massa de água infiltrada (kg);

D = diâmetro de infiltração (mm);

t = tempo necessário para a infiltração da água (s).

Figura 15 – Fixação do anel de infiltração plástico.



Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.6 Ensaio realizado em corpos de prova extraídos

Na sequência são descritos os ensaios realizados nos corpos de prova extraídos das placas de concreto permeável, os quais servem para avaliar o desempenho do material, diante dos diferentes cenários, quantificando suas propriedades físicas e mecânicas. A Figura 16 mostra o processo de extração dos

corpos de prova, no qual foram obtidas 4 amostras cilíndricas de dimensões 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.

Figura 16 – Extração de corpos de prova cilíndricos.



Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.6.1 Ensaio de densidade

Em concordância com a norma ASTM C1754 (2012), a densidade dos corpos de prova foi estipulada na idade de 27 dias. As massas das amostras foram aferidas na condição seca, submetendo-as à temperatura de 38 ± 3 °C em um intervalo de 24 ± 1 h, até alcançar constância de massa. A densidade, em kg/m^3 , foi determinada dividindo a massa dos corpos de prova pelo seu volume, que fora obtido com o auxílio de um paquímetro.

3.2.6.2 Ensaio de porosidade

A porosidade dos corpos de prova extraídos foi encontrada através do procedimento sugerido pela norma ASTM C1754 (2012), aos 27 dias. Primeiramente, mediu-se as suas massas na condição seca e, logo após, os corpos de prova foram submersos em água por um período de 30 minutos. Em seguida, as massas na condição submersa foram coletadas, com o emprego de uma balança hidrostática

(Figura 17). Para definir as dimensões da amostra e, decorrente disso o seu volume, foi utilizado um paquímetro. A porosidade (P) é calculada, conforme a Equação 2:

$$P (\%) = \left[1 - \left(\frac{M_d - M_s}{\rho_w * V} \right) \right] * 100 \quad (2)$$

Onde:

M_d = massa na condição seca da amostra (g);

M_s = massa na condição submersa da amostra (g);

ρ_w = densidade da água (g/cm³);

V = volume da amostra (cm³).

Figura 17 – Obtenção da massa submersa do corpo de prova.



Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.6.3 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi executado, na idade de 27 dias, com a utilização de um permeâmetro de carga variável (Figura 18a). Para prevenir perda de água ao longo do procedimento, os corpos de prova extraídos foram revestidos com uma membrana de látex (Figura 18b). A partir da altura inicial (h_1) e final (h_2), ambas sinalizadas no tubo vertical de acrílico do permeâmetro, foi determinado o tempo que a água levou para fluir através do corpo de prova. Com o amparo da Equação 3, a qual é oriunda da Lei de Darcy, mensura-se o coeficiente de permeabilidade (K):

$$K(cm/s) = \frac{a * L}{A * t} * \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3)$$

Onde:

a = área da seção transversal do tubo vertical (cm^2);

L = comprimento do corpo de prova (cm);

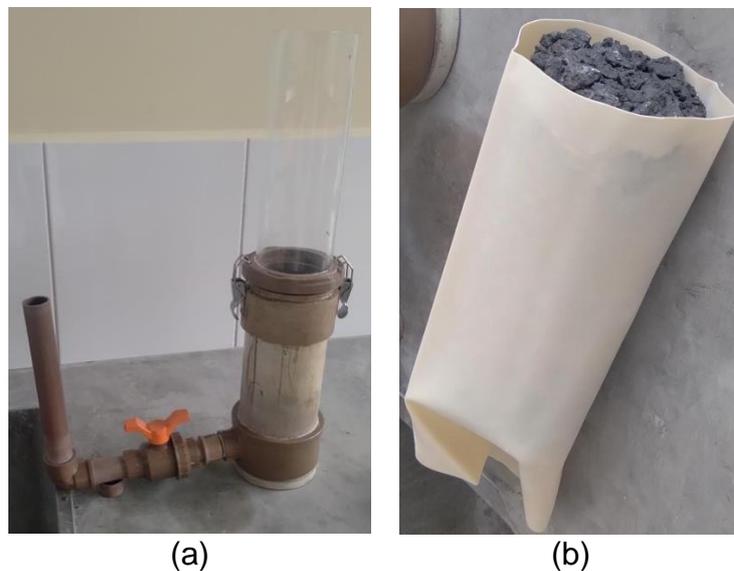
A = área da seção transversal do corpo de prova (cm^2);

t = tempo mensurado entre h_1 e h_2 (s);

h_1 = nível inicial da água (XX cm);

h_2 = nível final da água (X cm).

Figura 18 – Permeâmetro de carga variável (a) e revestimento da amostra (b).



Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.6.4 Ensaio de resistência à compressão

Com o intuito de obter a resistência à compressão da estrutura permeável, foi realizado o ensaio prescrito pela norma NBR 5739 (2007). O teste foi executado 28 dias após a moldagem, nas amostras cilíndricas (10 cm de diâmetro x 20 cm de altura) extraídas das placas de concreto permeável. O procedimento ocorreu depois da efetuação dos ensaios hidráulicos supracitados. Para tanto, os corpos de prova foram capeados com argamassa (Figura 19) visando uma melhor distribuição do carregamento no ensaio, devido a superfície irregular dos corpos de prova. Cabe ressaltar que os corpos de prova foram devidamente identificados, para que cada propriedade determinada fosse conhecida para cada amostra em particular.

Figura 19 – Capeamento dos corpos de prova para teste de compressão axial.



Fonte: Elaboração própria (2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Taxa de infiltração

Antes da extração das amostras, o ensaio de taxa de infiltração foi executado nas placas de concreto permeável, conforme descrito no item 3.2.5. Em relação aos resultados obtidos para as situações analisadas, os experimentos apresentaram valores de taxa de infiltração oscilando no intervalo de 35626,46 mm/h a 1479,4 mm/h. A Tabela 4 apresenta todos os resultados encontrados referentes à taxa de infiltração, bem como, os seus desvios padrões. A partir dos dados tabelados, elaborou-se um gráfico de Taxa de infiltração vs. Número de ciclos de entupimento (Figura 20), o qual associa as metodologias de manutenção aos diferentes cenários de colmatação. Cabe lembrar que cada ciclo representa 20 anos de exposição à natureza.

Com a ausência de técnicas de manutenção, representado pela linha SL no gráfico, fora observado um decréscimo acentuado na capacidade de infiltração da placa quando exposta aos ciclos de entupimento, comprometendo drasticamente a sua funcionalidade. No caso do elemento submetido a lavagem com água de alta pressão (L-água), foi possível conservar 61 % do seu desempenho hidráulico no primeiro ciclo de entupimento/limpeza e 36 % durante o segundo ciclo. Enquanto, no decorrer dos ciclos 1 e 2, o emprego da limpeza com jato de ar comprimido (L-ar) assegurou preservações de 76 % e 55 %, respectivamente, na aptidão drenante da placa. Em concordância com o estudo organizado por Sandoval *et al.* (2020), o método de limpeza com jato de ar comprimido, na comparação com a lavagem com água de alta pressão, demonstrou-se mais eficiente para a manutenção de elementos colmatados com areia. Esse comportamento é justificável, pois o compressor de ar consegue expelir as partículas alojadas nos poros internos e superficiais da estrutura, ao passo que a alta pressão de água tem como efeito a condução de grãos de areia para as camadas mais profundas da placa, apesar de realizar a remoção de uma parcela significativa dos mesmos.

Levando em consideração os valores atingidos, constatou-se que ambas metodologias de manutenção foram satisfatórias, tendo em vista que proporcionaram uma taxa de infiltração superior à maioria dos solos. Como instrumento de confirmação, realizou-se uma conferência com os valores de infiltração citados por Pinto (2006), que foram 3600 mm/h para solos arenosos e apenas 0,0036 mm/h no

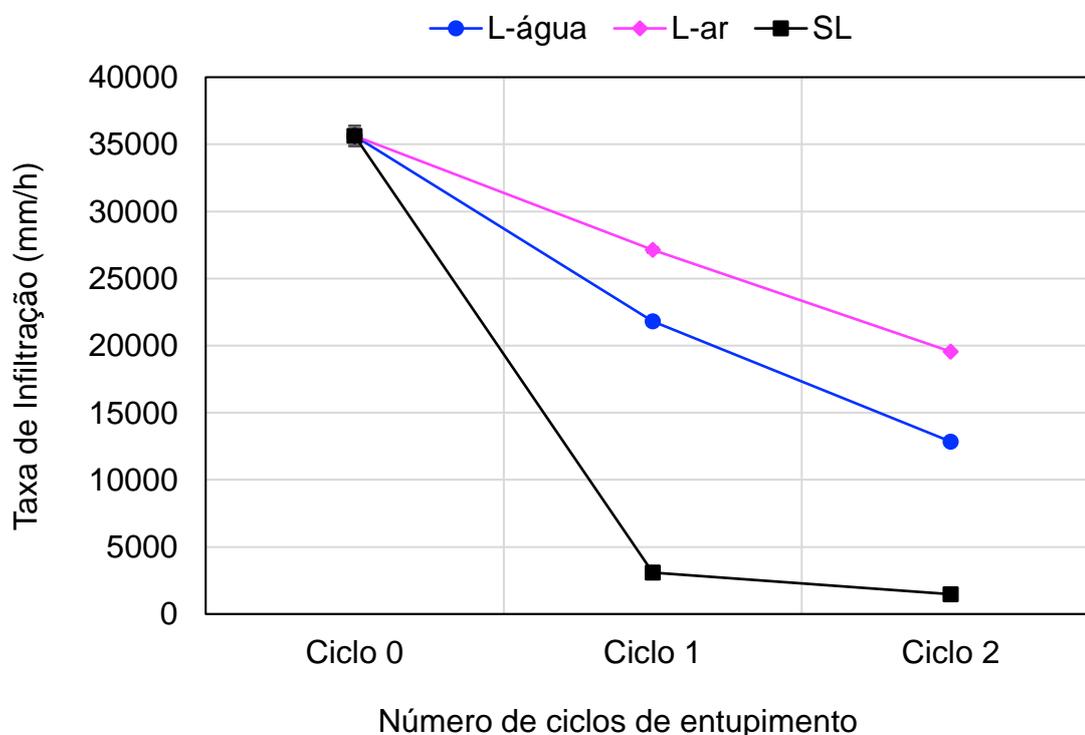
caso de argilas. Adicionalmente, é importante observar que a limpeza com jato de ar proporciona um espalhamento das partículas de areia para o entorno da placa. Neste sentido, considerando um pavimento contínuo e de maior largura, é possível que o método acarrete no transporte e concentração dos sedimentos para outras regiões do pavimento, gerando pontos de maior colmatção. Desta forma, tal fato pode ocasionar uma distribuição não uniforme da limpeza superficial.

Tabela 4 – Médias e desvio padrão (SD) das placas de concreto permeável (taxa de infiltração).

	Médias (mm/h)			Desvio Padrão		
	L-água	L-ar	SL	L-água	L-ar	SL
Ciclo 0	35626,46	35626,46	35626,46	750,84	750,84	750,84
Ciclo 1	21813,13	27127,63	3083,18	84,36	183,59	29,69
Ciclo 2	12851,40	19556,28	1479,40	223,31	88,84	19,38

Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 20 – Taxa de infiltração vs. Número de ciclos de entupimento.



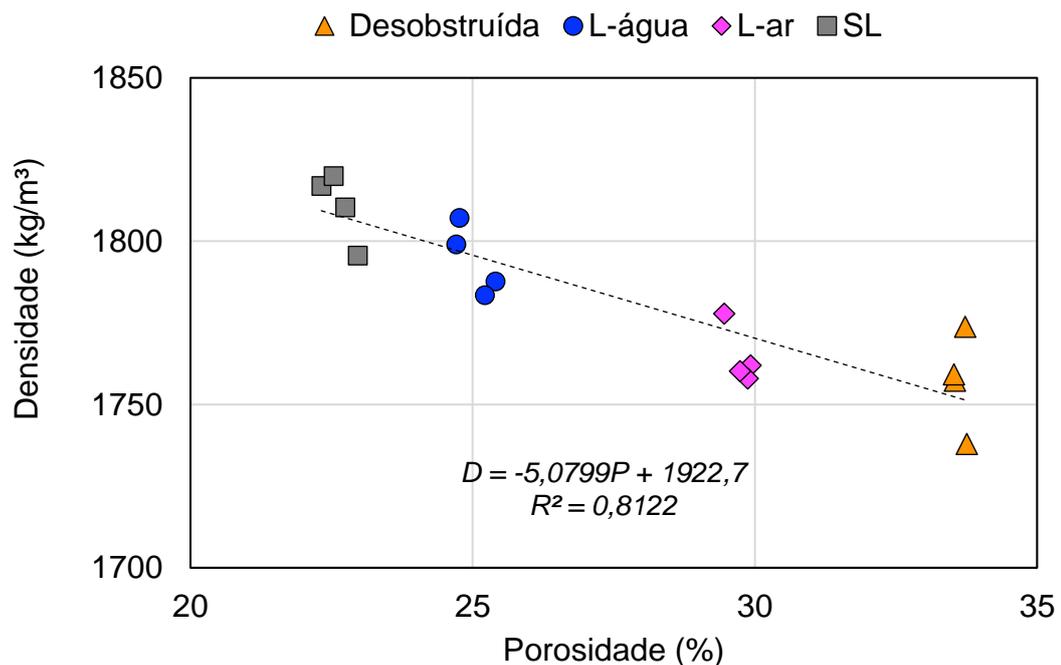
Fonte: Elaboração própria (2022).

4.2 Densidade vs. porosidade

No tocante a variação da densidade em função da porosidade, o gráfico da Figura 21 apresenta os resultados adquiridos para cada corpo de prova extraído a partir das quatro placas produzidas, ao final do último ciclo. Neste contexto, verificou-se que a relação entre a densidade e a porosidade é influenciada pela concentração sedimentar retida na estrutura permeável. Conforme indicado através da curva de regressão linear, o aumento da densidade provoca redução dos índices de porosidade. Como pressuposto, o comportamento mais semelhante ao da placa padrão desobstruída foi constatado no elemento submetido a limpeza com jato de ar comprimido, em razão dessa técnica possuir a melhor eficiência na desobstrução dos poros.

A Tabela 5 exibe os valores de porosidade média e desvio padrão obtidos nesse experimento, servindo como inspiração para a criação do gráfico contido na Figura 22. Segundo Tennis *et al.* (2004), quando o concreto permeável possui uma porosidade na ordem de 25 %, o mesmo consegue atingir boas características hidráulicas. O único registro de porosidade média inferior a 25 % ocorreu na placa entupida com ausência de limpeza, assim, evidenciando a importância da execução de manutenções periódicas no elemento.

Figura 21 – Densidade vs. Porosidade.



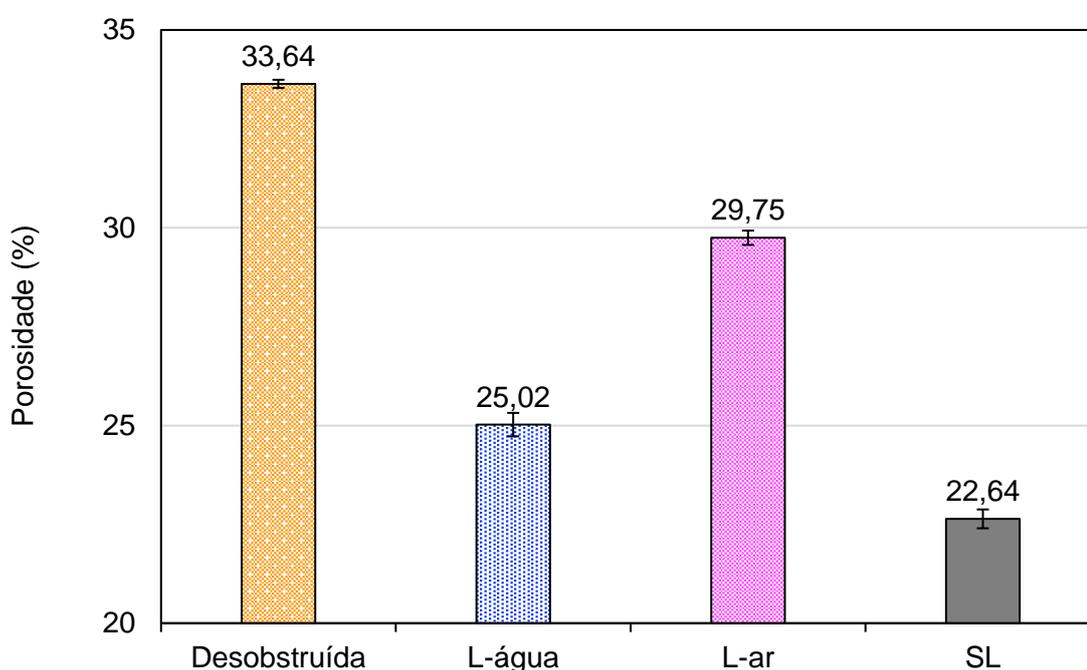
Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 5 – Média e desvio padrão das amostras (porosidade).

Tipo de Amostra	Porosidade Média (%)	Desvio Padrão
Desobstruída	33,64	0,1039
L-água	25,02	0,2959
L-ar	29,75	0,1807
SL	22,64	0,2383

Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 22 – Porosidade média.



Fonte: Elaboração própria (2022).

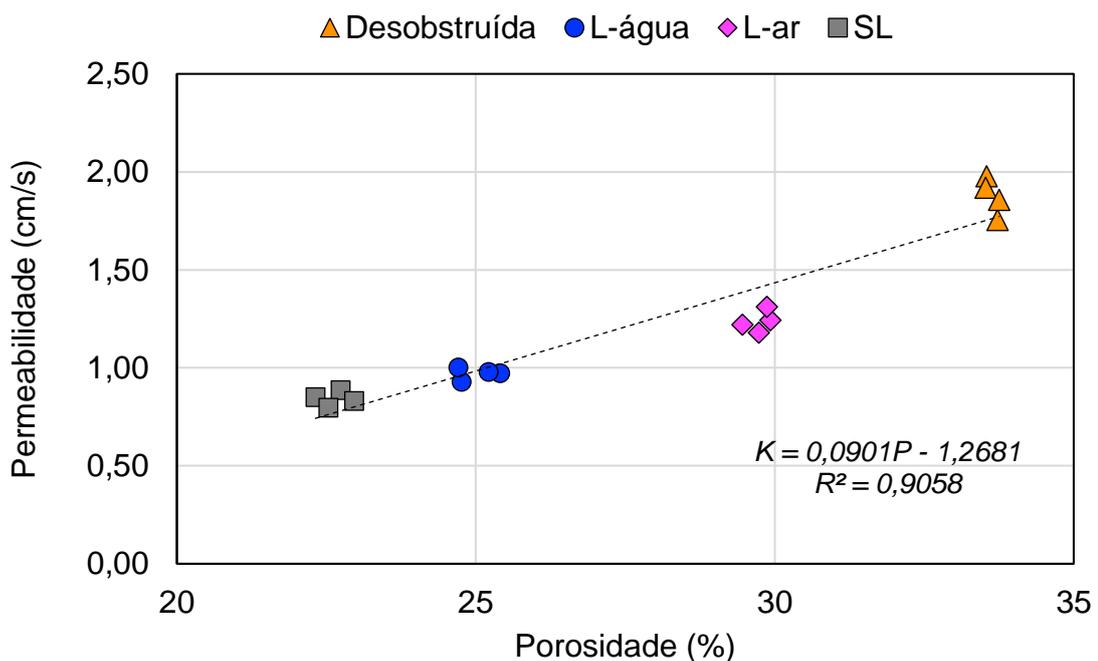
4.3 Permeabilidade vs. porosidade

Com o intuito de verificar a modificação da permeabilidade em função da porosidade para os distintos cenários explorados nesta pesquisa, gerou-se o gráfico esboçado na Figura 23. O comportamento observado no gráfico de Permeabilidade vs. Porosidade também pode ser retratado por uma relação linear, a qual aponta que a amplificação do coeficiente de permeabilidade é impulsionada pelo crescimento da porosidade. A respeito do coeficiente de permeabilidade, mesmo em corpos de prova de mesma origem, houve uma pequena variação nos valores atingidos. Como a compactação acontece exclusivamente na superfície superior do elemento, é

presumível que tal oscilação seja efeito da falta de uniformidade no adensamento de suas camadas inferiores, bem como, esse processo origina uma diferença de porosidade vertical nas amostras extraídas (Figura 24), as quais apresentam maior abertura na base.

Os resultados alcançados referentes às permeabilidades médias e seus desvios padrões, encontram-se inseridos na Tabela 6 e na Figura 25. Quanto aos valores de permeabilidade média, verificou-se uma oscilação no intervalo de 0,84 cm/s a 1,88 cm/s. De modo geral, os resultados obtidos foram bastante elevados, tendo em vista que o artigo elaborado por Haselbach, Valavala e Montes (2006) classifica taxas de permeabilidade entre 0,2 cm/s a 1 cm/s como satisfatórias. Ademais, é pertinente evidenciar que, em comparação com a conservação atingida no quesito porosidade média, a limpeza com jato de ar comprimido não conseguiu proporcionar ao material igual eficácia na preservação da permeabilidade. Como comprovação disso, a utilização do compressor de ar manteve 88 % dos índices de porosidade, enquanto a permeabilidade média foi conservada em 66 %. O estudo desenvolvido por Neithalath (2004) menciona que a permeabilidade não é influenciada somente pela porosidade da amostra, levando em consideração que a conectividade entre os poros é outro fator determinante para o transporte de água ao longo da estrutura.

Figura 23 – Permeabilidade vs. Porosidade.



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 24 – Porosidade vertical do corpo de prova.



(a) parte superior do corpo de prova (b) parte inferior do corpo de prova



(c) perfil da distribuição vertical da porosidade do corpo de prova

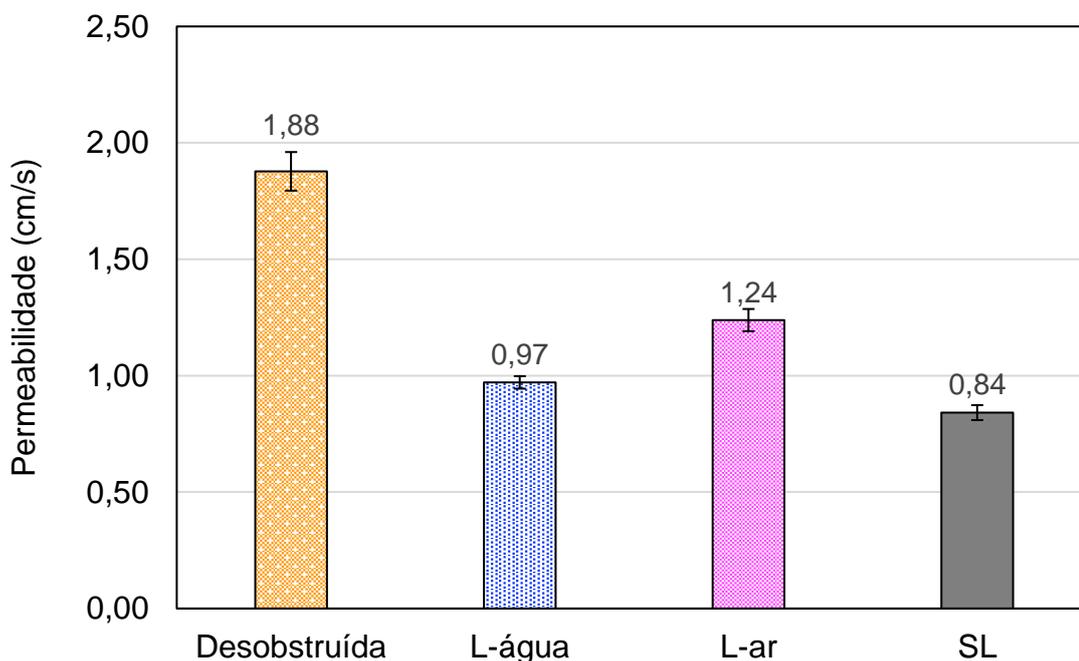
Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 6 - Média e desvio padrão das amostras (permeabilidade).

Tipo de Amostra	Permeabilidade Média (cm/s)	Desvio Padrão
Desobstruída	1,88	0,0829
L-água	0,97	0,0268
L-ar	1,24	0,0478
SL	0,84	0,0322

Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 25 – Permeabilidade média.



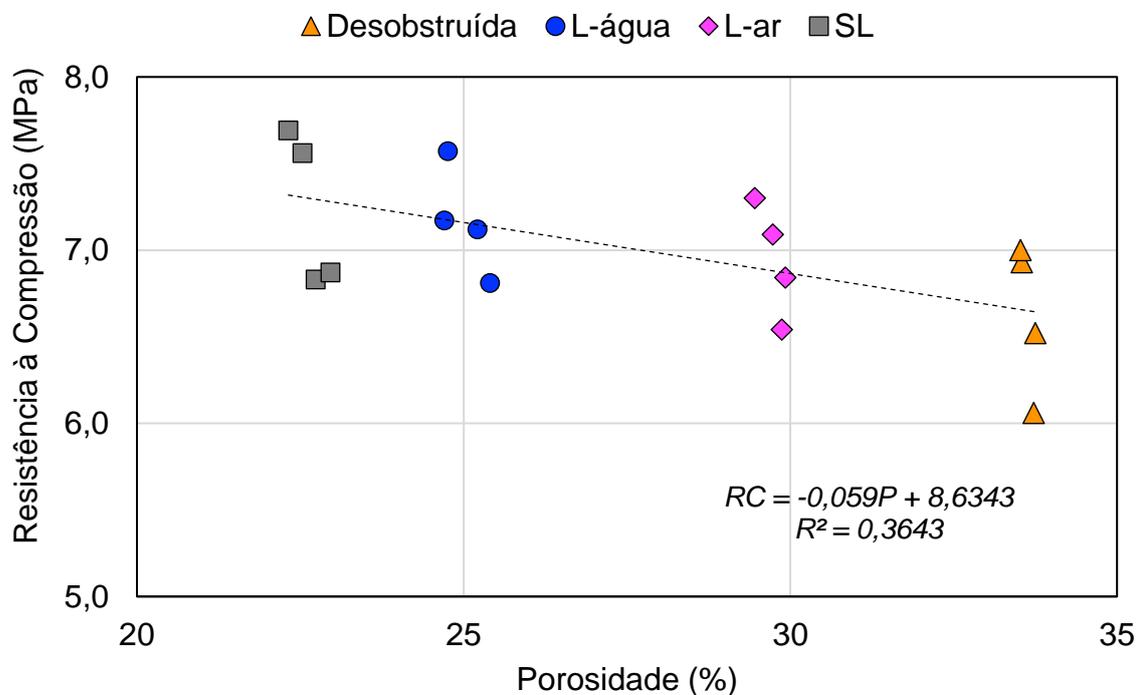
Fonte: Elaboração própria (2022).

4.4 Resistência à compressão vs. porosidade

Em relação a variação da resistência à compressão em função da porosidade, o gráfico da Figura 26 expressa os valores adquiridos para todas as condições aplicadas no experimento. A partir da curva de regressão linear, notou-se que o decréscimo de porosidade tende a ocasionar aumento dos índices de resistência à compressão, todavia necessita-se salientar que o coeficiente de determinação (R^2) atingido não foi satisfatório. Possivelmente, esta inconsistência ocorre devido à irregularidade dos corpos de prova, que causa o surgimento de diferentes concentrações de tensões durante o ensaio de compressão, provocando modificação no modo de ruptura do material. Outra justificativa plausível para o baixo valor de R^2 encontrado, é o fato do rolo não conseguir proporcionar igual pressão de compactação em todas as partes da estrutura permeável, de maneira que origina discrepância na resistência à compressão de amostras extraídas de uma mesma placa. Ainda, a extração de corpos de prova pode acarretar na quebra de agregados e/ou microfissuras da argamassa ou zona de transição entre os materiais, influenciando os resultados individualmente.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para as resistências à compressão médias e seus desvios padrões, auxiliando na concepção do gráfico pertencente à Figura 27. O presente estudo alcançou valores de resistência à compressão média na faixa de 6,63 MPa a 7,24 MPa, localizando-se dentro do intervalo relatado por ACI (2006), que foi de 2,8 MPa a 28 MPa. O entupimento com ausência de manutenção culminou em uma resistência à compressão média levemente superior aos demais casos, sendo consequência, teoricamente, do preenchimento de uma parcela dos vazios do elemento com partículas de areia.

Figura 26 – Resistência à compressão vs. Porosidade.



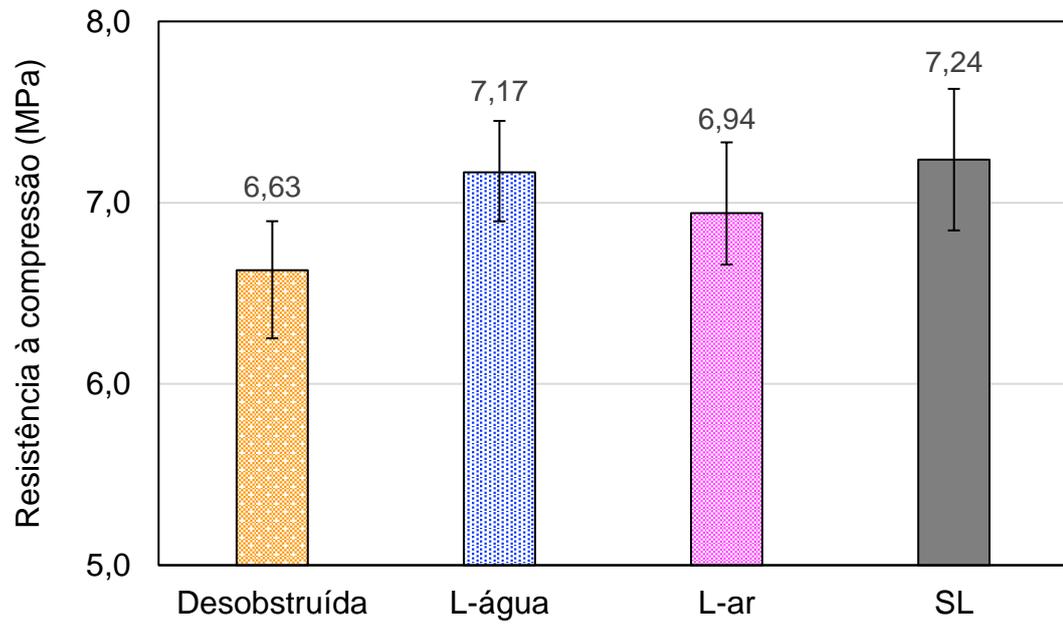
Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 7 – Valores médios e desvio padrão (SD) de resistência à compressão.

Tipo de Amostra	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão
Desobstruída	6,63	0,3755
L-água	7,17	0,2702
L-ar	6,94	0,2838
SL	7,24	0,3905

Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 27 – Resistência à compressão média.



Fonte: Elaboração própria (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho procurou, além de examinar a variação de desempenho do concreto permeável quando submetido ao fenômeno de entupimento, sugerir metodologias apropriadas para a manutenção da estrutura. A partir dos resultados adquiridos, chegou-se as seguintes considerações:

- Em relação a eficiência das metodologias de manutenção, verificou-se que as duas técnicas são adequadas para a limpeza de elementos obstruídos com areia, pois asseguram valores de taxa de infiltração superiores à maior parte dos solos. No decorrer do experimento, a limpeza com jato de ar comprimido apresentou melhor eficiência, conservando 76 % da aptidão drenante no primeiro ciclo de entupimento/limpeza e 55 % no segundo ciclo;
- A estrutura submetida a limpeza com jato de ar comprimido obteve, em termos de porosidade, o desempenho mais próximo ao da placa padrão desobstruída. Somente o elemento com ausência de manutenção atingiu porosidade média abaixo dos índices recomendados na literatura, os quais são necessários para proporcionar características hidráulicas satisfatórias ao concreto permeável. Portanto, a realização de manutenções periódicas é extremamente importante para o correto funcionamento do elemento;
- Os resultados de permeabilidade média obtidos foram elevados, tendo em vista que, na maioria das vezes, ultrapassaram os intervalos de valores mencionados na literatura. A respeito da conservação da permeabilidade, a manutenção com o emprego do compressor de ar não disponibilizou ao elemento a mesma eficiência de preservação alcançada nos índices de porosidade, em razão da conectividade entre os poros também influenciar no deslocamento da água por toda a extensão da amostra;
- Dentro das limitações exibidas pelo concreto permeável, os valores de resistência à compressão atingidos foram aceitáveis, destacando-se o entupimento com ausência de manutenção, que apresentou resultados sutilmente melhores que os outros cenários explorados. Este aumento de resistência, possivelmente, tem como consequência o preenchimento de uma fração dos vazios da estrutura com material arenoso.

Por último, ao longo da execução do programa experimental surgiram novas questões para serem investigadas, as quais apresentam-se como ideias para trabalhos futuros:

- Analisar a utilização de uma pequena porção de agregado miúdo na confecção do concreto permeável, porque existe a possibilidade de melhoria nos valores de resistência à compressão, sem comprometimento acentuado de suas qualidades hidráulicas;
- Fabricação de uma fôrma encaixável, que permita a passagem do rolo em diferentes camadas do elemento, com o intuito de reduzir a incidência de variações nos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, Laura Albuquerque. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Pervious Concrete**. Farmington Hills, MI, United States of America, ACI 522R-06, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete**. West Conshohocken, PA, United States of America, ASTM C1754/C1754M, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete**. West Conshohocken, PA, United States of America, ASTM C1701/C1701M-09, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, NBR NM 53, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, NBR NM 248, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, NBR 7211, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, NBR 5739, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Pavimentos permeáveis de concreto – Requisitos e procedimentos**. Rio de Janeiro, NBR 16416, 2015.
- BATEZINI, Rafael. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- CHANDRAPPA, Anush K.; BILIGIRI, Krishna P. **Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review**. Construction and Building Materials, v. 111, p. 262-274, 2016.
- COSTA, Fernanda B. P. **Análise e desenvolvimento de misturas de concreto permeável para aplicação em pavimentação**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.
- COSTA, Fernanda B. P. *et al.* **Boas práticas para dosagem e testes laboratoriais em concreto permeável**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 11, n. 5, p. 1151-1159, out. 2018.

Determinação da permeabilidade do solo. Laboratório de Geotécnica e Prospecção, mar. 2016.

HASELBACH, Liv; FREEMAN, Robert. **Vertical porosity distributions in pervious concrete pavement**. ACI Materials Journal, v. 103, n. 6, p. 452-458, 2006.

HASELBACH, Liv M.; VALAVALA, Srinivas; MONTES, Felipe. **Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems**. Journal of Environmental Management, v. 81, p. 42-49, 2006.

HENDERSON, Vimy. **Evaluation of the Performance of Pervious Concrete Pavement in the Canadian Climate**. 2012. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Waterloo, Waterloo, ON, Canadá, 2012.

HOLTZ, Fabiano da Costa. **Uso de concreto permeável na drenagem urbana: análise da viabilidade técnica e do impacto ambiental**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico – 2010**. Rio de Janeiro, IBGE, 2010.

KEVERN, John T.; HASELBACH, Liv; SCHAEFER, Vernon R. **Hot Weather Comparative Heat Balances in Pervious Concrete and Impervious Concrete Pavement Systems**. Journal of Heat Island Institute International, 2012.

KUANG, Xuheng *et al.* **Particle Separation and Hydrologic Control by Cementitious Permeable Pavement**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007.

LAMB, Gisele Santoro. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

NEITHALATH, Narayanan. **Development and characterization of acoustically efficient cementitious materials**. 2004. Tese (Doutorado em Filosofia) - Purdue University, West Lafayette, IN, United States of America, 2004.

OLEK, J. *et al.* **Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials**. Final Report, p. 8-72, set. 2003.

PANSERA, Alexandre Camargo; PIMENTA, Henrique Sesana; ANDRADE, Lucas Temponi. **Elaboração de concreto permeável para a construção civil**. XIV Jornada Científica das Faculdades Integradas de Cacoal – UNESC, 2016.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 363 p.

POLASTRE, Bruno; SANTOS, Lara Damha. **Concreto permeável**. AUT 221 – Arquitetura, Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2006.

SANDOVAL, Gersson F. B. *et al.* **Assessing the phenomenon of clogging of pervious concrete (Pc): Experimental test and model proposition.** Journal of Building Engineering, v. 29, 2020.

SANDOVAL, Gersson F. B. *et al.* **Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging.** Construction and Building Materials, v. 248, 2020.

SCHWETZ, P. F. *et al.* **Concreto permeável: otimização do traço para pavimentação de fluxo leve.** XIII Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção, set. 2015.

SINGH, Avishreshth; SAMPATH, Prasanna V.; BILIGIRI, Krishna P. **A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects.** Construction and Building Materials, v. 261, 2020.

TUCCI, Carlos E. M.; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações Urbanas na América do Sul.** 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. 156 p.

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

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