

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DA COLMATAÇÃO DE UM TRECHO
EXPERIMENTAL DE CONCRETO PERMEÁVEL
PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS DE
CONCRETO**

Felipe Raul Meert Merten

Porto Alegre
Maio de 2021

FELIPE RAUL MEERT MERTEN

**AVALIAÇÃO DA COLMATAÇÃO DE UM TRECHO
EXPERIMENTAL DE CONCRETO PERMEÁVEL
PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS DE
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadoras: Ângela Gaio Graeff e Vanessa Fátima Pasa Dutra

Porto Alegre
Maio de 2021

FELIPE RAUL MEERT MERTEN

**AVALIAÇÃO DA COLMATAÇÃO DE UM TRECHO
EXPERIMENTAL DE CONCRETO PERMEÁVEL
PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS DE
CONCRETO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, maio de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD. pela University of Sheffield, UK
Orientadora

Eng. Helena Lunkes Strieder
MSc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BR

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
PhD. pela University of Leeds, UK

Prof. Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)
Dr^a. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BR
Orientadora

Dedico este trabalho aos meus pais,
por todo apoio durante toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente aos meus pais, que são os motivadores de tudo que vivenciei até hoje, que sempre colocaram a educação em primeiro lugar e, com isso, graças a eles, venho a me tornar um Engenheiro Civil.

A todos os meus amigos que se fizeram presente ao longo dos últimos 5 anos em que estive em Porto Alegre, em especial aos meus colegas de graduação, companheiros de profissão e amigos para toda a vida Carol, Gabriela, Klaus, Leonardo, Maria Luiza e Thais, em que se fizeram presente para todo o tipo de suporte, companhia e ajuda.

Aos meus inúmeros amigos de Santa Cruz, por toda a companhia e felicidade proporcionada em meus momentos de descanso, àqueles que acreditaram que eu entraria em uma universidade federal e me tornaria engenheiro.

Aos meus professores, por cada aprendizado transmitido ao longo de todo o curso, que contribuirão de maneira imensa ao profissional que serei, com agradecimento principal às professoras Ângela Graeff e Vanessa Fátima Pasa Dutra, por todo o aprendizado que me propiciaram na época em que fui bolsista de iniciação científica no LEME, responsáveis por me trazerem ao assunto deste trabalho, me despertando um enorme interesse e fascínio em torno do tema.

À minha colega e engenheira Helena Lunkes Strieder, parceira e extremamente competente durante toda a pesquisa realizada nos últimos anos, sendo também idealizadora da construção do trecho experimental de concreto permeável. Além disso, agradeço a todos os pesquisadores do LEME que deram início, incentivo e continuidade à pesquisa acerca do concreto permeável, que permite que atualmente tenhamos um conhecimento mais avançado no assunto.

À CNPQ, órgão de fomento à pesquisa que proporcionou a construção da pista de concreto permeável, permitindo a execução deste trabalho em cima do tema, além do financiamento de minha Bolsa de Iniciação Científica através do projeto Universal.

Our greatest glory is, not in never falling,
but in rising every time we fall

Nelson Mandela

RESUMO

Pavimentos de concreto permeável vêm sendo utilizados com mais frequência devido as suas inúmeras propriedades benéficas ao meio ambiente. Entre elas, devolver ao solo a capacidade de infiltração, permitindo que a água retorne ao seu curso natural inclusive com a melhoria na qualidade da mesma e a redução no impacto dos efeitos da ilha de calor urbana. Além disso, com a crescente urbanização, aumentou-se a quantidade de resíduo proveniente da construção civil, passando-se a realizar o seu reuso como agregados, evitando o aumento de lixo e o esgotamento de recursos naturais. Contudo, pavimentos permeáveis enfrentam problemas provenientes do processo de colmatação, em que ocorre o entupimento dos seus poros, diminuindo o seu potencial drenante, o que reduz a efetividade de suas propriedades hidráulicas. Para contornar este problema, esta pesquisa objetiva analisar a infiltração de um trecho experimental de concreto permeável com o uso de agregados de concreto ao longo do tempo e avaliar diferentes métodos de manutenção encontrados na bibliografia a fim de se determinar qual o mais efetivo para maximizar a permeabilidade durante a vida útil do pavimento. Como resultado, atestou-se uma melhor efetividade dos métodos de sucção e jato de água de alta pressão seguida de sucção.

Palavras-chave: Concreto permeável; agregado de concreto reciclado; pavimento experimental; colmatação; manutenção.

ABSTRACT

Pervious concrete pavements are being used more frequently due to their various beneficial properties to the environment. Among them, return the infiltration capacity to the soil, allowing the water to return to its natural course, including the improvement in water quality and reducing the impact of the urban heat island effects. In addition, with the increasing urbanization, the amount of waste from civil construction increased, starting to be reused as aggregates, avoiding the increase of waste and the depletion of natural resources. However, permeable pavements face problems due to clogging process, in which their pores become clogged, reducing their drainage potential, which reduces the effectiveness of its hydraulic properties. To avoid this problem, this research aims to analyze the infiltration of a pervious concrete experimental section with the use of concrete aggregates over the time and to evaluate different maintenance methods found in the bibliography in order to determine which one is more effective to maximize the useful life of the pavement. As a result, a better effectiveness of the suction and high-pressure water followed by suction methods was attested.

Keywords: Pervious concrete; recycled concrete aggregate; experimental pavement; clogging; maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Seção transversal esquemática de um pavimento de concreto permeável	15
Figura 2 – Ilustração da colmatação em um pavimento permeável	16
Figura 3 – Seção transversal do pavimento implantado	19
Figura 4 – Vegetação próxima ao pavimento	20
Figura 5 – Dimensões do trecho, localização dos pontos e simulação de fluxo de veículos ...	21
Figura 6 – Selagem interna com massa de calafetar no anel de infiltração	22
Figura 7 - Esquematização dos métodos de manutenção	23
Figura 8 - Gráfico da taxa de infiltração para a faixa 1, em mm/h.....	25
Figura 9 - Aspecto da faixa 1 próxima ao ponto 2 antes e após a manutenção.....	25
Figura 10 - Gráfico da taxa de infiltração para a faixa 2, em mm/h.....	26
Figura 11 - Gráfico da taxa de infiltração para a faixa 3, em mm/h.....	27
Figura 12 - Gráfico da taxa de infiltração para a faixa 4, em mm/h.....	27
Figura 13 - Gráfico da taxa de infiltração para a faixa 5, em mm/h.....	28
Figura 14 - Aspecto da faixa 5 próxima ao ponto 10 antes e após a manutenção.....	28
Figura 15 - Taxa de infiltração média por faixa, em mm/h.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxa de infiltração média por faixa em cada mês, em mm/h.....	29
--	----

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ARC – Agregado Reciclado de Concreto

ASTM - American Society for Testing and Materials

CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

PVC – Policloreto de Vinila

RCC – Resíduo da Construção Civil

RS – Rio Grande do Sul

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 BACKGROUND	15
2.1 PAVIMENTOS DE CONCRETO PERMEÁVEL	15
2.2 USO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	16
2.3 PROCESSO DE COLMATAÇÃO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	16
2.4 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS	17
2.5 MÉTODOS DE MANUTENÇÃO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS.....	18
3 MÉTODO	19
3.1 PISTA EXPERIMENTAL EM CONCRETO PERMEÁVEL.....	19
3.2 ENSAIO DE INFILTRAÇÃO	20
3.3 MÉTODOS DE MANUTENÇÃO	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
REFERÊNCIAS	31
AGRADECIMENTOS	34

Avaliação da colmatção de um trecho experimental de concreto permeável produzido com agregados reciclados de concreto

Clogging evaluation of a pervious concrete experimental section produced with recycled concrete aggregates

RESUMO

Pavimentos de concreto permeável vêm sendo utilizados com mais frequência devido as suas inúmeras propriedades benéficas ao meio ambiente. Entre elas, devolver ao solo a capacidade de infiltração, permitindo que a água retorne ao seu curso natural inclusive com a melhoria na qualidade da mesma e a redução no impacto dos efeitos da ilha de calor urbana. Além disso, com a crescente urbanização, aumentou-se a quantidade de resíduo proveniente da construção civil, passando-se a realizar o seu reuso como agregados, evitando o aumento de lixo e o esgotamento de recursos naturais. Contudo, pavimentos permeáveis enfrentam problemas provenientes do processo de colmatção, em que ocorre o entupimento dos seus poros, diminuindo o seu potencial drenante, o que reduz a efetividade de suas propriedades hidráulicas. Para contornar este problema, esta pesquisa objetiva analisar a infiltração de um trecho experimental de concreto permeável com o uso de agregados de concreto ao longo do tempo e avaliar diferentes métodos de manutenção encontrados na bibliografia a fim de se determinar qual o mais efetivo para maximizar a permeabilidade durante a vida útil do pavimento. Como resultado, atestou-se uma melhor efetividade dos métodos de sucção e jato de água de alta pressão seguida de sucção.

Palavras-chave: Concreto permeável; agregado de concreto reciclado; pavimento; colmatção; manutenção.

ABSTRACT

Pervious concrete pavements are being used more frequently due to their various beneficial properties to the environment. Among them, return the infiltration capacity to the soil, allowing the water to return to its natural course, including the improvement in water quality and reducing the impact of the urban heat island effects. In addition, with the increasing urbanization, the amount of waste from civil construction increased, starting to be reused as aggregates, avoiding the increase of waste and the depletion of natural resources. However, permeable pavements face problems due to clogging process, in which their pores become clogged, reducing their drainage potential, which reduces the effectiveness of its hydraulic properties. To avoid this problem, this research aims to analyze the infiltration of a pervious concrete experimental section with the use of concrete aggregates over the time and to evaluate different maintenance methods found in the bibliography in order to determine which one is more effective to maximize the useful life of the pavement. As a result, a better effectiveness of the suction and high-pressure water followed by suction methods was attested.

Keywords: Permeable concrete; aggregate of recycled concrete; pavement; clogging; maintenance.

1 INTRODUÇÃO

Observa-se, nas últimas décadas, o desenvolvimento desenfreado de áreas urbanas, com o aumento das cidades para regiões mais periféricas, assim como a ocupação de locais que antes eram destinados às áreas verdes. Como consequência, grandes centros urbanos têm convivido de maneira cada vez mais frequente com a ocorrência de acúmulo de grandes volumes de água em ruas e avenidas em eventos com incidência de chuva. No Brasil, um levantamento realizado pela Pesquisa de Informações Básicas Municipais (MUNIC-IBGE, 2017) entre os anos de 2013

a 2017 apontou que, dos municípios com mais de 500 mil habitantes, 93% deles foram atingidos por alagamentos.

As enchentes e inundações acontecem, principalmente, devido à impermeabilização do solo, promovido pelas edificações e superfícies impermeáveis, como é o caso do pavimento asfáltico e de concreto convencional, resultado deste crescimento sem o devido planejamento urbano.

Deste modo, as enchentes vêm causando vários prejuízos à população, em sua maioria econômicos, visto que paralisam toda a cidade, causando estragos e perdas. Entretanto, o maior problema vivenciado é de caráter ambiental. Devido a impermeabilização do solo, a água passa a enfrentar dificuldades em escoar para o seu curso natural, aumentando de forma acelerada o escoamento superficial e redução da infiltração de água ao solo, desregulando todo o balanço hídrico do ecossistema.

Visando contornar este problema, algumas medidas para mitigar os efeitos da urbanização desenfreada vêm sendo desenvolvidas. Um exemplo são os pavimentos de concreto permeável, os quais vêm sendo estudados como medida para a redução destes danos (Debnath et al., 2018; Batezini et al., 2021; Sonebi et al., 2016; Haselbach et al., 2017; Chandrappa et al., 2016; Zhong et al., 2018; Batezini, 2013; Costa et al., 2018; ACI 522.1-13, 2013). Este é um pavimento que faz uso de concreto composto de cimento Portland, agregado graúdo e água, por vezes aditivos e adições e, na maioria das vezes, sem a presença de agregados miúdos, o que propicia a formação de uma elevada quantidade de poros em sua estrutura, que podem variar de 15 a 35% (Kia et al., 2017; Sonebi et al., 2016; Lamb, 2014; ACI 522R, 2010).

A estrutura porosa permite que a água percole pelo concreto e atinja o solo, minimizando o seu acúmulo e o seu escoamento superficial, recarregando os lençóis subterrâneos permeável (Chandrappa, 2016). Os poros também proporcionam a armazenagem de água, fazendo com que o concreto funcione como reservatório. Esta água também pode escoar por um sistema de drenagem ou, em um uso mais sustentável, pode ser captada e reutilizada. Ademais, o concreto permeável possui benefícios como a melhora na qualidade das águas pluviais (Haselbach et al., 2014), redução dos ruídos (Zhang et al., 2020; Park et al., 2005) e a melhora do conforto térmico, retendo menos calor se comparado a um revestimento convencional, assim reduzindo o impacto dos efeitos da ilha de calor urbana (ACI 522R, 2010; Chandrappa et al., 2016; Chen et al. 2019; Gaedicke et al., 2014; Lorenzi et al., 2018).

Todavia, com a utilização de pavimentos permeáveis, identificou-se um fenômeno: os poros deste material, os quais permitem que a água percole, ao longo do tempo vão sendo preenchidos por detritos presentes no ambiente, como argila, areia e sujeira urbana dos mais variados tipos. Este processo, chamado de colmatação, resulta no entupimento dos poros e, assim, acaba diminuindo a vida útil do pavimento no que diz respeito às suas propriedades hidráulicas. A fim de prolongar a vida útil de pavimentos permeáveis, mantendo a capacidade de infiltração, são propostos diferentes tipos de manutenção a serem realizadas (Razzaghmanesh et al., 2018; Winston et al., 2016)

Enquanto isso, outro grande problema ambiental, que também está se agravando devido ao exponencial desenvolvimento urbano, é o elevado acúmulo e a destinação do Resíduo da Construção Civil (RCC), que é gerado em grandes quantidades pela indústria da construção. No Brasil, por exemplo, 60% de todos os resíduos sólidos coletados são provenientes da construção civil (ABRELPE, 2018). Este resíduo, por ser especial, requer também uma destinação diferenciada, o que resulta em um processo com maiores custos envolvidos e, por consequência disso, o seu descarte acaba sendo realizado em locais inapropriados. Como consequência, verifica-se o desperdício de materiais que poderiam ser reutilizados e os prejuízos ambientais. A reutilização de RCC propicia uma série de benefícios, dentre eles a redução das emissões de CO₂ (Yap et al., 2018).

Com o objetivo de resolver os problemas expostos referentes à má destinação dos resíduos da construção civil, além de se fazer o uso dos benefícios proporcionados pelo concreto permeável,

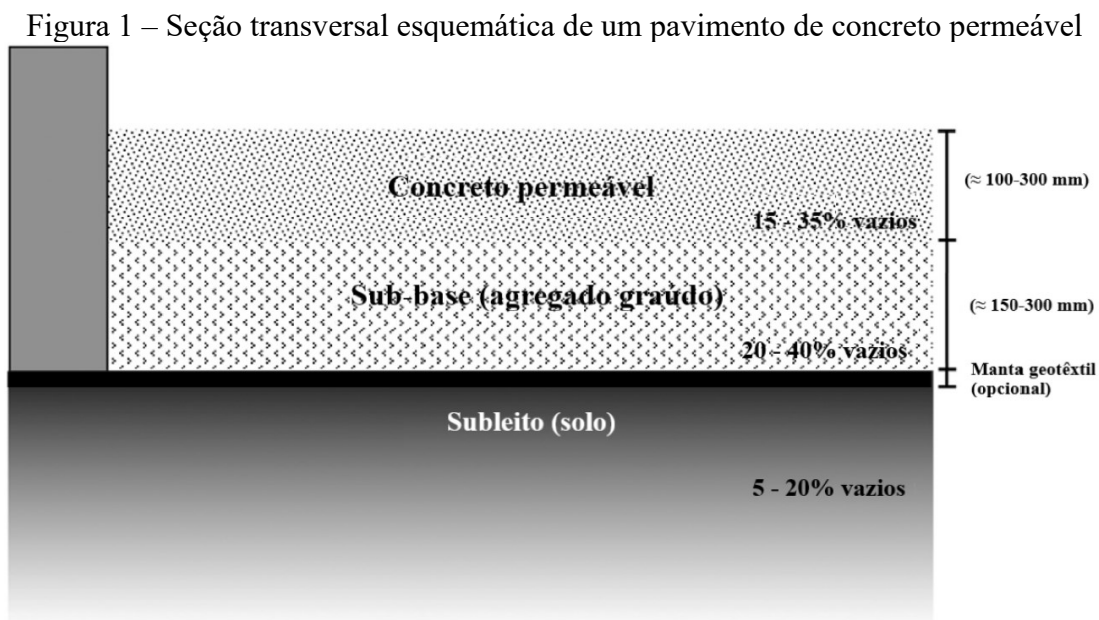
este trabalho unifica ambos os materiais no estudo do concreto permeável produzido com agregado de reciclado de concreto (ARC). Mais especificamente, este trabalho tem como foco a avaliação de um pavimento de concreto permeável de ARC no que se refere ao processo de colmatação, verificando quais os tipos de manutenção podem ser realizados neste tipo especial de pavimento, identificando o mais eficiente entre eles.

Estudos sobre concreto permeável produzidos com agregados naturais são encontrados em grande número na bibliografia disponível (Costa et al., 2018; Sonebi et al., 2016), assim como estão disponíveis estudos da sua aplicação em pavimentos (Xie et al., 2018; Debnath et al., 2018; Haselbach et al., 2017; Chandrappa et al., 2016; Zhong et al., 2018; ACI 522.1-13, 2013), da sua colmatação (Haselbach et al., 2006a; Kia et al., 2017) e da sua manutenção (Winston et al., 2016; Sandoval et al., 2020a; Drake et al., 2013). O mesmo não se constata para o concreto permeável com ARC, poucas são as pesquisas dedicadas a entender este material (El-Hassan et al., 2019; Berry et al., 2012; Bhutta et al., 2013) e as suas questões (Sandoval et al., 2020b).

2 BACKGROUND

2.1 Pavimentos de Concreto Permeável

Um pavimento de concreto permeável consiste em uma camada superior de concreto permeável, com uma altura que pode variar entre 10 a 30 cm. Esta é assentada sobre uma camada de sub-base granular, que pode servir tanto para suportar as cargas do pavimento quanto para desempenhar a função de reservatório. Quando a sub-base é utilizada com esta segunda finalidade, de camada reservatório, ela geralmente possui maior espessura, podendo chegar a 30 cm, a fim de aumentar o volume de água que pode ser armazenado (Kia et al., 2017; ACI 522R, 2010). O esquema de uma seção transversal de um pavimento de concreto permeável pode ser visualizado na Figura 1.



Fonte: adaptado de Kia *et al.* (2017).

A decisão de utilizar a camada de sub-base como camada de armazenamento da água pluvial pode ser baseada na análise do solo, uma vez que solos mais compactos possuem uma menor capacidade de infiltração. A NBR 16416 (ABNT, 2015) aconselha que subleitos com

condutividade hidráulica superiores a 0,1 mm/s são os mais adequados para pavimentos permeáveis e, desta maneira, pode-se infiltrar a água pelo subleito em sua totalidade. Além deste fator, Drake et al. (2013) definem que também não é aconselhável manter a infiltração de água em solos nativos contaminados ou em locais, como é o caso de países situados em climas mais frios, que aplicam sal para o degelo da neve sobre o pavimento. Além disso, uma das opções a ser utilizada em pavimentos permeáveis é a implantação de um sistema de drenagem com canos corrugados, levando a água diretamente para o sistema de drenagem público de água pluvial. Outra opção mais sustentável é o reaproveitamento desta água pluvial através de um sistema de coleta de água, levando-a para um reservatório.

2.2 Uso de Resíduos da Construção Civil

De acordo com Tam et al. (2001), o início da utilização de maneira significativa dos resíduos de construção civil (RCC) ocorreu após o final da Segunda Guerra Mundial. A utilização de resíduos da construção civil na forma de agregado e na preparação do concreto em geral já é uma realidade em diversos mercados. No Brasil, o seu uso ganhou bastante força após a Resolução CONAMA Nº 307/2002 (CONAMA, 2002), em que se estabeleceram diretrizes e procedimentos para o gerenciamento dos resíduos provenientes da construção civil.

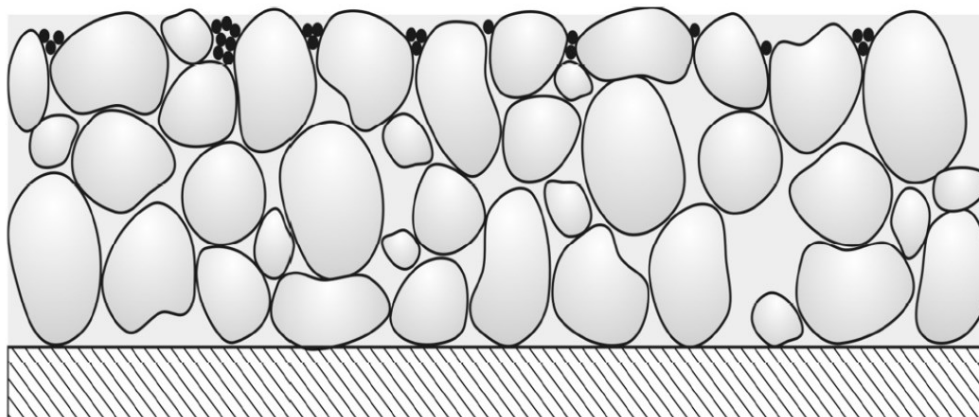
Os benefícios provenientes do reuso de RCC possuem caráter ambiental através do seu potencial de diminuição de material descartado em aterros, redução de emissão de CO₂ devido à diminuição do seu transporte e à extração de novos agregados, além de reduzir a exploração de recursos naturais. Ademais, a reutilização também pode ser vista através de um viés econômico, consequente da redução com gastos de matéria prima e transporte.

Para efeitos de controle das propriedades hidráulicas, é também fundamental um elevado controle no tipo de resíduo da construção civil a ser utilizado no pavimento, assim como o controle de sua britagem, pois é desejável que a forma do agregado se assimile ao formato do pedrisco (ou brita 0), em formato mais arredondado, a fim de se obter uma melhor capacidade hidráulica.

2.3 Processo de Colmatação de Pavimentos Permeáveis

Ao longo do tempo, conforme o pavimento de concreto permeável é utilizado, as sujeiras presentes no meio ambiente passam a se incorporar na parte superior da estrutura do pavimento, conforme ilustrado na Figura 2. Essas partículas preenchem os poros presentes no concreto, de maneira que obstrui a percolação de água pelo pavimento, e este processo, em que os vazios do concreto se entopem, é denominado de colmatação.

Figura 2 – Ilustração da colmatação em um pavimento permeável



Fonte: Castro (2011).

Alguns fatores podem acelerar este processo de colmatação. Um fator muito relevante a ser levado em conta é a presença de vegetações próximas ao pavimento, em que a queda de suas folhas e frutos podem gerar um lixo orgânico que se deposita em seus poros e causam o seu entupimento. Este problema foi verificado por Kayhanian et al. (2012), em que se observou que grande parte dos sedimentos removidos consistem em partículas maiores que 38 μm provenientes da vegetação em torno do pavimento.

Outros pontos agravantes do processo são eventos como temporais e ventos intensos, que trazem com uma maior facilidade a sujeira presente no entorno ao pavimento, visto que o vento provoca a queda e produção de várias partículas sólidas e a água da chuva carrega consigo as partículas poluentes. Ademais, o tráfego de veículos também causa a divisão destas partículas sólidas em partículas mais finas e as compacta para dentro dos vazios (Kia et al., 2017), o que ajuda na acomodação destes detritos para dentro dos poros do pavimento.

Welker et al. (2013) realizaram um estudo em pavimentos de asfalto e de concreto permeável em um estacionamento, em que se removeu o material presente nos vazios dos pavimentos a fim de se realizar uma análise da sua origem. Verificou-se que grande parte do material presente era resultado da deterioração do pavimento, ocasionado pelo processo de abrasão. Os pavimentos permeáveis, por possuírem vazios, ficam extremamente suscetíveis ao processo de abrasão, visto que a quantidade de argamassa que envolve os seus agregados é bem menor quando comparado ao concreto convencional, o que enfraquece as suas ligações e maximiza a perda por abrasão do pavimento.

Deste modo, a colmatação do pavimento de concreto permeável é um dos principais fatores que reduzem a funcionalidade desta tecnologia. Estudos como o realizado pela Wisconsin Department of Natural Resources (2014) afirmam que diversos fatores possuem o potencial de iniciar e progredir o processo de colmatação de pavimentos de asfalto poroso e concreto permeável convencional: as características da chuva da região em que se situa o pavimento, características do solo, qualidade do ar e temperatura, área de contribuição da drenagem, tipos e volumes de tráfego de veículos.

Haselbach e Freeman (2006a) afirmam que a compactação superficial do concreto permeável resulta em uma distribuição de porosidade vertical de forma que a parte superior do pavimento possuirá taxas de porosidades menores que o restante do pavimento. Assim, espera-se que todo o material argiloso será efetivamente filtrado pelos poros menores próximos ao topo do pavimento, com uma pequena fração deste material se infiltrando mais ao fundo do sistema (Haselbach, 2010). Ainda, de acordo com a mesma autora, em eventos extremos como tempestades, substanciais quantidades de argila se depositam em pavimentos permeáveis reduzindo drasticamente a sua capacidade drenante e até mesmo podendo obstruir a área. Porém, uma vez que esse material fica retido na parte superficial, grande parte deste material pode ser removido com procedimentos simples de manutenção, como a varredura, lavagem de água de alta pressão, entre outros métodos.

2.4 Propriedades Hidráulicas

As principais propriedades hidráulicas a serem verificadas no concreto permeável é a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração. Para a realização do ensaio de permeabilidade, seguindo recomendação da ACI 522R (2010) e os procedimentos da NBR 14545 (ABNT, 2000), utiliza-se um permeâmetro de carga variável.

Porém, para a realização do teste em um permeâmetro, é necessária a extrusão de corpos de prova do pavimento e, considerando que o intuito da pesquisa é verificar a colmatação do pavimento em pontos específicos ao longo do tempo, não há viabilidade em fazer ensaios de permeabilidade que permitam a comparação do mesmo ponto em diferentes períodos.

Desta maneira, a pesquisa se limitou a analisar as propriedades do pavimento no que diz respeito à sua taxa de infiltração como base para verificar a evolução da sua propriedade hidráulica,

seguindo os procedimentos especificados pela ASTM C1701/C1701M (ASTM, 2017). Com base nesta norma, a taxa de infiltração (I) pode ser calculada através da Eq. 1:

$$I \text{ (mm/h)} = \frac{K \cdot m}{D^2 \cdot t} \quad \text{Eq. 1}$$

em que K é um valor de conversão das unidades para os dados medidos (igual a 4583666000), m é a massa de água a ser utilizada no ensaio, em kg, D é o diâmetro do anel de PVC utilizado no ensaio, em milímetros, e t é o tempo em que a água leva para infiltrar no pavimento, medido entre o momento que a água toca no pavimento até o momento em que não haja nenhuma lâmina de água sobre a superfície, medido em segundos.

É importante enfatizar que a taxa de infiltração de um pavimento de concreto permeável está diretamente ligada ao seu índice de vazios (porosidade), assim como também da forma e granulometria de seus agregados. Um pavimento de maior porosidade pode possuir uma taxa de infiltração inferior a um pavimento de menor porosidade por possuir diferentes distribuições de vazios em sua estrutura, o que influencia na conectividade entre os poros. Segundo Perialisi (2017), a porosidade do concreto permeável pode ser dividida em três tipos: poros da argamassa, vazios de ar e poros da estrutura. No entanto, muitos dos vazios podem não possuir interligação até a base da sua estrutura (Chandrappa, 2016), o que não permite à água a percolação total através do pavimento, ficando armazenada naquele vazio, além daqueles vazios que estão isolados em relação ao demais, que não contribuem no transporte da água.

2.5 Métodos de Manutenção de Pavimentos Permeáveis

Manutenções periódicas são a principal ferramenta para manter a vida útil de um pavimento de concreto permeável em relação às suas propriedades hidráulicas. O principal objetivo de realizar a manutenção é de remover as partículas que causam a colmatação do pavimento a fim de se recuperar a capacidade drenante do pavimento, retomando a sua taxa de infiltração a níveis melhores. Haselbach et al. (2010) afirmam que a limpeza da superfície do pavimento pode retornar a capacidade de infiltração a níveis ótimos novamente.

Baladès et al. (1995) listam algumas técnicas de manutenção para pavimentos permeáveis em geral. Dentre elas, são descritas: varredura, varredura seguida de sucção, sucção e jato de água de alta pressão combinada com sucção simultânea. Além destes métodos, faz-se menção ao uso de molhagem seguida de varredura, porém deixa à dúvida a sua efetividade, em que descreve ser uma técnica de sucesso bem limitado, em que em alguns casos esta técnica até mesmo aumentou o processo de colmatação com a penetração de poluentes para camadas mais fundas do pavimento.

Winston et al. (2016) listam alguns outros métodos de manutenção de pavimento de asfalto poroso, como a varredura mecânica, varredura de ar regenerativo, varredura à vácuo, aspiração manual, lavagem de alta pressão e fresagem do asfalto poroso. Deste estudo, para o caso de uma manutenção de um asfalto poroso, a aspiração manual, lavagem de pressão e fresagem obtiveram crescente sucesso no processo de recuperação da taxa de infiltração do asfalto poroso.

Dentre os métodos listados pelos estudos anteriores, o ACI Committee (ACI 522R, 2010) concluiu que o método de manutenção mais efetivo era o de varredura à vácuo seguido por lavagem de alta pressão. Porém, a definição de método mais efetivo entre diversos autores não possui uma unanimidade, especialmente porque diferentes tipos de pavimento, com diferentes tipos de porosidade, podem ter uma eficácia com diferentes métodos um dos outros. Além disso, há uma grande diferença entre o tipo de colmatação em que cada pavimento sofre, como é o caso de colmatação através de areia, de argila, de material proveniente das vegetações, entre outros tipos.

Em relação à quantidade necessária de manutenção a ser realizada anualmente, recomenda-se um intervalo de uma vez por ano (Drake e Bradford, 2013) a duas a quatro vezes por ano (Razzaghmanesh e Beecham, 2018). Porém, esta frequência de manutenção pode variar muito em função da configuração dos arredores do pavimento e também das condições climáticas locais.

Em suma, diversos estudos indicam que pavimentos permeáveis ficarão ineficientes em relação às suas propriedades hidráulicas caso não receberem um método de manutenção eficiente e periódico. Métodos de manutenção não restauram em sua totalidade as taxas de infiltração de pavimentos permeáveis, mas têm o potencial de elevar para níveis aceitáveis e consideráveis, permitindo que o pavimento permeável atue em suas funções de drenar a água superficial e permitir que ela escoe para o seu percurso natural.

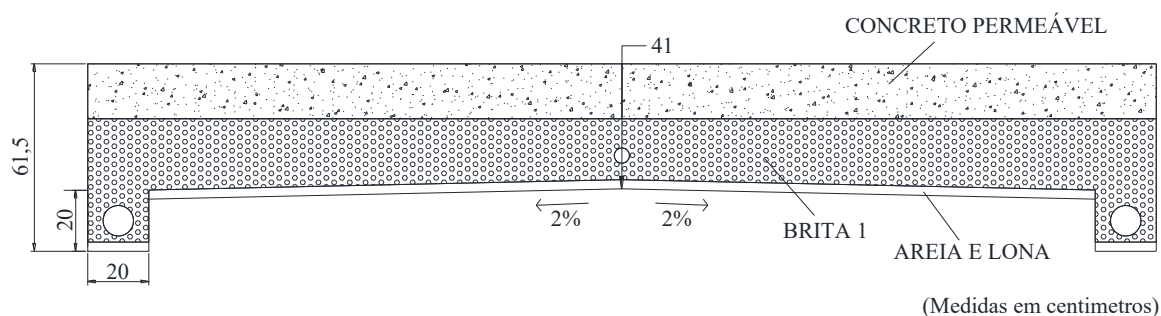
3 MÉTODO

3.1 Pista Experimental em Concreto Permeável

O desenvolvimento do presente estudo possui como base a construção e a avaliação de uma pista experimental com revestimento de concreto permeável com a utilização de resíduo da construção civil como agregado, sendo ele 100% de concreto reciclado. Este pavimento foi construído no Campus do Vale, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. A pista experimental foi desenvolvida para um trabalho de mestrado, por Strieder (2021) junto aos pesquisadores do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME-UFRGS), sendo destinado às demais pesquisas acerca do concreto permeável, assim como o uso de agregados de concreto reciclado. Ela possui dimensões de 3,5 m de largura por 3,5 m de comprimento, o que resulta em uma área total de 12,25 m², ocupando metade de uma pista de circulação de 2 faixas de sentidos opostos. Este pavimento se encontra em um local onde os veículos apresentam velocidade reduzida, por se situar em um campus de universidade, além de predominar um tráfego leve de baixo volume.

O pavimento fica assentado em um local de solo residual jovem, o que não altera o seu funcionamento visto que o mesmo foi totalmente isolado por uma lona impermeável, que impede a colmatação por bombeamento de finos do solo para as camadas superiores. Desta maneira, toda a infiltração é realizada através do sistema de drenagem construído para esta finalidade. A porosidade da camada de reservatório foi estimada em 35%, possuindo uma espessura média de 20 centímetros, enquanto o revestimento possui uma camada de 18 cm, conforme esquematizado na figura 3.

Figura 3 – Seção transversal do pavimento implantado



Fonte: Strieder (2021).

O local em que o pavimento se situa é de fácil acesso. Contudo, no lado oposto à via (aproximadamente 4 metros distante do pavimento) se encontram algumas vegetações, conforme figuras 4 e 5, o que tende a produzir bastante sujeira. Observa-se queda frequente de

suas folhas próximo ao local, intensificando o processo de colmatação do pavimento. Estas folhas representam boa parte da sujeira presente na região.

Figura 4 – Vegetação próxima ao pavimento



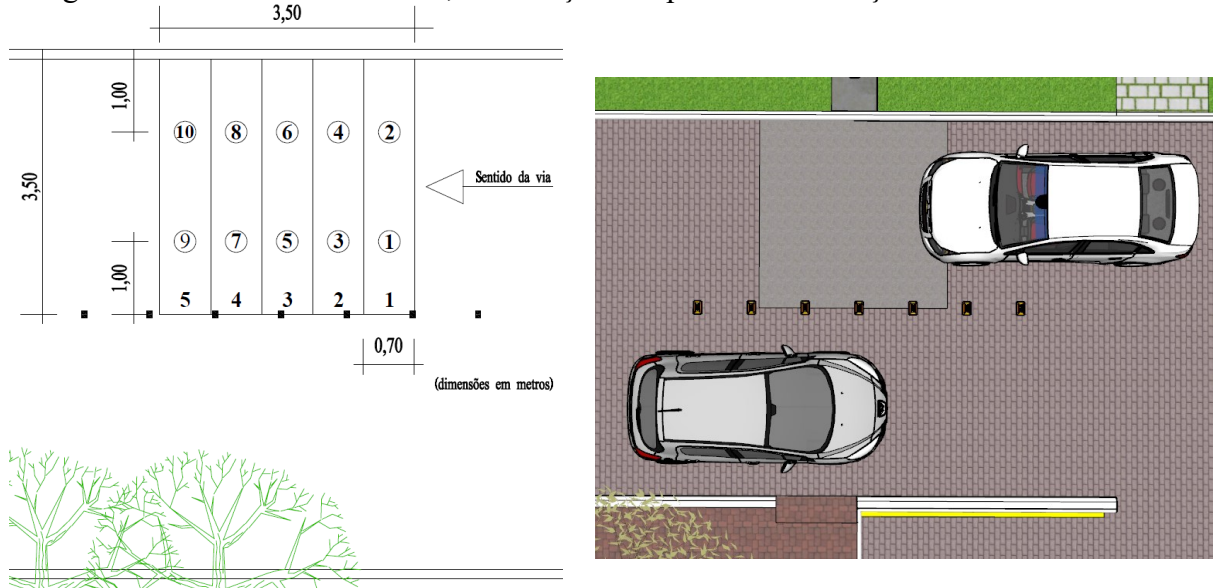
A pista foi construída em março de 2020 e liberada para veículos em agosto de 2020. Além disso, a pista não recebeu nenhum tipo de manutenção entre os meses de agosto de 2020 e janeiro de 2021. A partir de janeiro de 2021 iniciaram os estudos do presente trabalho. Entre janeiro e maio foram realizados ensaios mensais de infiltração na pista experimental, com intervalo de 1 mês entre os mesmos. No mês de maio, antes da realização do último ensaio de infiltração, efetuou-se as manutenções da pista. Portanto, foram 9 meses sem manutenção do pavimento desde a sua liberação e, dos 5 ensaios realizados, os quatro primeiros (janeiro a abril) utilizaram a pista em processo de colmatação. Sendo assim, obteve-se resultados que têm por finalidade verificar a diferença na taxa de infiltração do pavimento proveniente do processo de colmatação e do tipo de manutenção realizada.

3.2 Ensaio de Infiltração

Os testes realizados no pavimento consistiram em ensaios de infiltração ao longo do tempo, seguindo as determinações da ASTM C1701/C1701M (ASTM, 2017). Além disso, dividiu-se o pavimento em 5 faixas de tamanhos iguais (3,50 de comprimento por 0,70 m de largura), perpendiculares ao sentido do fluxo de veículos. A divisão destas faixas obedece às etapas de concretagens quando realizada a construção da pista, porém todas com o mesmo traço (Strieder, 2021). Assim, entende-se que o valor de infiltração de cada faixa pode variar, resultante de diferenças de execução. Como exemplo, pode-se citar as diferentes energias de compactação em cada faixa, resultando em diferentes densidades e porosidades, o que está diretamente ligado à taxa de infiltração pois, uma vez que a energia de compactação é maior, menor será a porosidade do local, reduzindo os vazios do pavimento. Como consequência, dificulta-se a passagem de água pelo pavimento.

Em cada uma destas faixas, foram analisados 2 pontos diferentes, conforme Figura 5. A localização destes pontos foi escolhida de maneira a coincidir com o local com a maior predominância de passagem de pneus na via, propiciando aos pontos maior acúmulo de sujeira e colmatação, uma vez que os pneus dos carros trazem sujeira ao pavimento e também a compactam durante a sua passagem (Kia et al., 2017). Assim, considerando que um carro médio possui distância entre pneus de mesmo eixo de 1,50 m, e que a pista em questão possui 3,50 m, os pontos de estudo foram posicionados a uma distância de 1,00 m de cada borda lateral da pista.

Figura 5 – Dimensões do trecho, localização dos pontos e simulação de fluxo de veículos



Fonte: Realizado pelo autor.

Além disso, a fim de condicionar a passagem dos carros sobre os pontos em estudo, foram instalados tachões de sinalização dividindo os dois fluxos (Figura 5). Deste modo, entende-se que os pontos demarcados no pavimento possuem um maior potencial de passar pelo processo de colmatação, o que não necessariamente indica que se trata do local de menor taxa de infiltração da faixa. Isto porque, conforme já descrito anteriormente, o pavimento de concreto permeável é extremamente heterogêneo, e a sua taxa de infiltração está diretamente relacionada à tortuosidade e percentual de porosidade.

Foi realizado um ensaio de infiltração em cada um dos pontos a cada mês, com o objetivo de acompanhar a infiltração no pavimento nestes pontos ao longo do tempo. O ensaio, conforme dita a ASTM C1701/C1701M (ASTM, 2017), foi executado com a utilização de um anel de infiltração com 30 cm de diâmetro, colocado nos pontos adotados. O anel foi selado com massa de calafetar em sua base tanto interna quanto externamente, preenchendo-se os vazios oriundos das irregularidades do pavimento, evitando que a água vaze e se movimente horizontalmente. As irregularidades na superfície do pavimento permeável são muito frequentes em função principalmente da característica porosa do material. O procedimento descrito pode ser visualizado nas Figuras 6 e 7.

Figura 6 – Selagem interna com massa de calafetar no anel de infiltração



Verificou-se que a precisão dos resultados é profundamente influenciada pela selagem. Para garantir a qualidade dos dados, este procedimento foi, então, realizado com bastante cuidado. A realização da pré-molhagem prevista anteriormente às medições necessárias para o cálculo da infiltração propriamente dita, permitiu identificar os locais de perda de água do anel, e assim melhorar a sua estanqueidade, garantindo resultados mais confiáveis.

Seguindo as instruções da ASTM C1701/C1701M (ASTM, 2017), foram realizadas duas marcações no anel de infiltração, uma a 10 mm da base e outra a 15 mm da base, para controle do nível de água a ser inserido no anel. Estas marcações auxiliam na manutenção da altura da coluna de água sobre o pavimento em todos os ensaios.

Conforme descrito anteriormente, o ensaio é realizado em duas partes. A primeira consiste em uma pré-molhagem feita com a adição de 3,6 kg de água ao anel, a uma taxa em que o nível de água fique entre ambos os pontos demarcados. O tempo é cronometrado a partir do instante em que a água toca no pavimento, até o momento em que não sejam mais visualizadas poças de água no pavimento, estando ele apenas encharcado. Na sequência, analisa-se o resultado da pré-molhagem. No caso de o tempo ser inferior a 30 segundos, realiza-se o teste empregando 18 kg de água. No caso de o tempo ser superior a 30 segundos, realiza-se o teste empregando 3,6 kg de água. O teste é realizado dentro de 2 minutos após o fim da pré-molhagem, seguindo a mesma metodologia da pré-molhagem, com registro do tempo transcorrido.

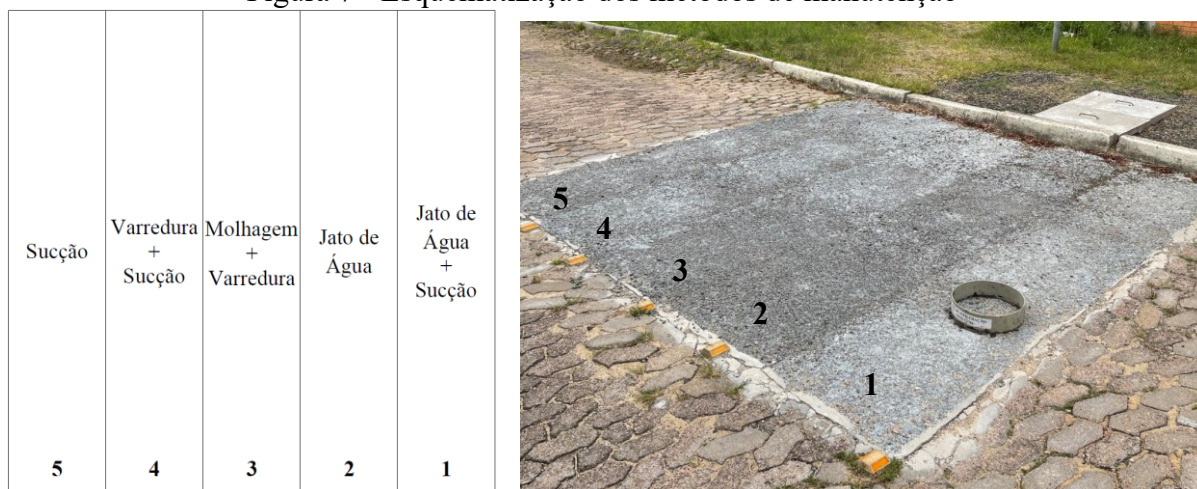
3.3 Métodos de Manutenção

Verificou-se na bibliografia uma variada gama de opções de manutenção de pavimento de concreto permeável. O critério de escolha das opções empregadas no presente estudo levou em conta principalmente opções com melhores custo x benefício, por motivos de viabilidade financeira para a execução da manutenção dos pavimentos permeáveis, à não necessidade de uma equipe especializada e equipamentos especiais para a realização da manutenção, também para viabilidade da pesquisa em questão. É importante que os métodos sejam de fácil acesso e viáveis economicamente pois isso permite uma maior disseminação do uso de pavimentos permeáveis.

Assim, novamente dividiu-se o pavimento em 5 faixas para a sua manutenção. Em cada faixa foi aplicado um método distinto: na primeira faixa foi escolhida a manutenção através de jatos de água de alta pressão com posterior sucção, para a segunda faixa apenas a utilização de jatos de água de alta pressão, para a terceira faixa o umedecimento com a posterior varredura, para a quarta faixa a varredura seguida de sucção e na quinta faixa apenas a aplicação de sucção dos

sedimentos. A disposição dos métodos de manutenção por faixa pode ser visualizada na figura 7.

Figura 7 - Esquematisação dos métodos de manutenção



Fonte: realizado pelo autor.

Além dos fatores descritos anteriormente para seleção das formas de manutenção, também se considerou o caráter ecológico, que também é um objetivo nesta pesquisa. Desta forma, optou-se pela análise das opções de varredura com posterior sucção e de se realizar apenas a sucção por se tratarem de alternativas em que não há o emprego de água, o que, no caso de pavimentos de grande área ou até mesmo regiões suscetíveis a períodos de seca, inviabilizaria a sua utilização. As opções de umedecimento com posterior varredura e a utilização de apenas jato de água de alta pressão, por sua vez, foram escolhidas para que se dispensasse a utilização de equipamentos de sucção. A última escolha, aquela com de jato de água de alta pressão com posterior sucção, foi também analisada a fim de se verificar a sua efetividade frente aos demais métodos, visto que a mesma foi apontada na bibliografia como um método de manutenção eficiente no que diz respeito à melhora da taxa de infiltração.

Em relação aos equipamentos utilizados, para a realização das manutenções que fazem o uso do método de sucção, utilizou-se um equipamento soprador de folhas da marca Stihl, modelo BGE 71, de potência 1 kW/cv, enquanto isso para as manutenções com o uso de jato de água de alta pressão, utilizou-se uma lavadora de alta pressão Electrolux UltraWash de 1800W e 2.200 psi. Para as manutenções com o uso de varredura, utilizou-se uma vassoura de cerdas macias.

Outro ponto importante analisado foi realizar a análise dos métodos de jato de água de alta pressão e de sucção tanto juntos como separados. Assim, é possível verificar a efetividade de cada método separado, bem como ambos os métodos juntos, e ver o percentual de melhora na taxa de infiltração.

Preocupou-se em deixar os métodos que utilizam água em faixas próximas, não havendo sobreposição de água sobre os outros métodos. De qualquer maneira, como o ensaio é realizado em apenas um ponto, não levando em conta a área inteira da faixa, tornou-se mais fácil o controle de possível sobreposição de um método de manutenção sobre o outro.

Outro detalhe levado em consideração foi a localização das manutenções que faziam o uso da varredura. Este processo, que se obtém sucesso após uma suscetível passagem da vassoura sobre o pavimento para retirar os sedimentos presentes, também pode ser danoso ao pavimento devido à perda por abrasão e desprendimento de agregados que causa ao mesmo. O concreto permeável empregado, por ser feito com a substituição de 100% de seu agregado natural por agregado de concreto proveniente da reciclagem da construção civil, segundo Yap et al. (2018), possui perdas por abrasão maiores em relação àquele produzido por agregado natural. Em

observação dos mesmos autores, em até 20% de substituição do agregado natural por agregado de concreto, as perdas por abrasão foram similares ao pavimento de referência (40% de abrasão). Para teores de substituição acima de 20%, apresentou-se uma maior perda de abrasão, na faixa de 50 a 55%.

Assim, foi visualmente verificado que a faixa de número 5 possuía uma maior degradação devido à abrasão em relação às demais faixas, o que foi resultado de sua concretagem, principalmente por ter sido a primeira faixa a ser concretada, apresentando alguns problemas executivos. Desta maneira, descartou-se para esta faixa a utilização de manutenção com varrição, e se observou as possíveis perdas abrasivas nas faixas que possuirão processos de varrição a fim de controlar se este será um método benéfico ao pavimento, mesmo que se atinja boas taxas de infiltração.

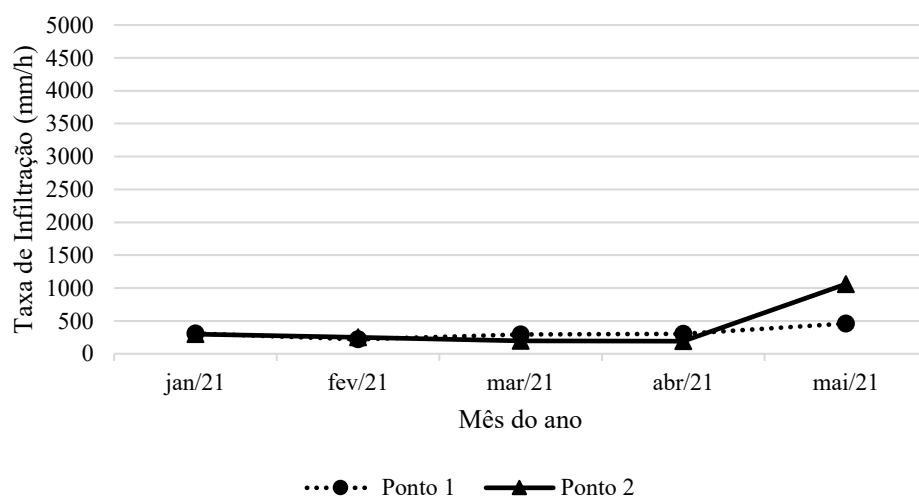
Após executados todos os métodos de manutenção descritos em suas respectivas faixas, foi realizado o ensaio de infiltração final em cada um dos pontos e, finalmente, calculados e analisados os resultados, o que permitiu verificar qual dos tipos de manutenção foi o mais efetivo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos no pavimento ao longo dos meses podem ser verificados nos gráficos expostos a seguir. O gráfico da figura 8 apresenta os dados de taxa de infiltração da faixa 1 do pavimento, aplicando-se o método de manutenção de jato de água de alta pressão seguido de sucção. Este trecho possuía desde o início dos ensaios as menores taxas de infiltração de todo o pavimento, o que pode ser motivado por ser a primeira faixa em que os carros acessam o trecho. Sendo a primeira faixa, as sujidades depositadas na mesma são levadas pelo fluxo de veículos. Em sua estrutura, foi verificada uma elevada presença de sedimentos finos compostos por argila, que são extremamente mais prejudiciais que sedimentos grossos, como é o caso de areia, em termos de redução de sua permeabilidade (Haselbach, 2006b).

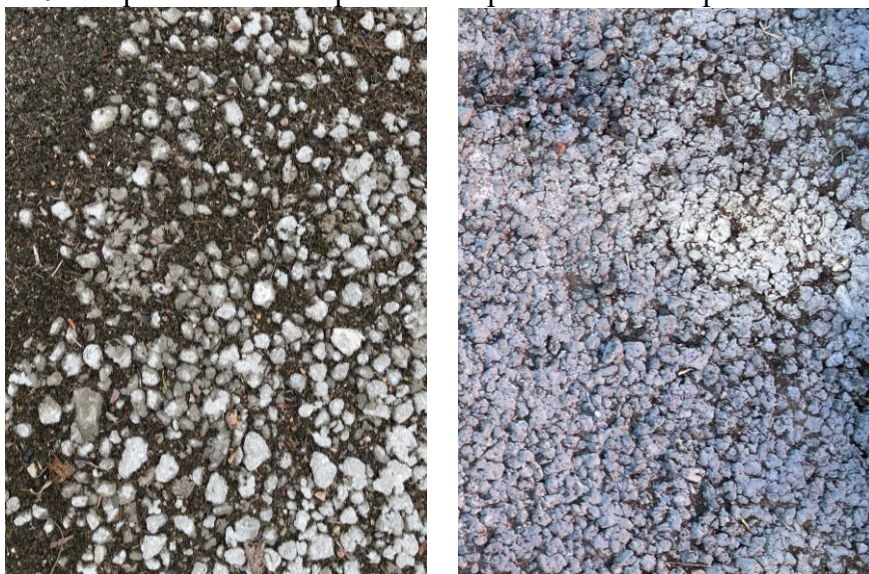
O jato de água de alta pressão tem a capacidade de descolar e retirar os sedimentos de argila e também os detritos de concreto acumulados no pavimento ao longo do tempo, proveniente do seu processo de perda por abrasão. Enquanto isso, o equipamento de sucção tem a função de sugar os detritos que restam no pavimento. Comparativamente ao estudo de Strieder (2021), esta faixa possuía uma taxa de infiltração média de 3.721 mm/h, medida logo após a construção do pavimento. Porém, os pontos utilizados para os ensaios de infiltração realizados pela autora, tanto nesta como nas demais faixas, não são os mesmos que utilizados neste estudo, o que já motiva uma variabilidade.

Figura 8 - Gráfico da taxa de infiltração para a faixa 1, em mm/h



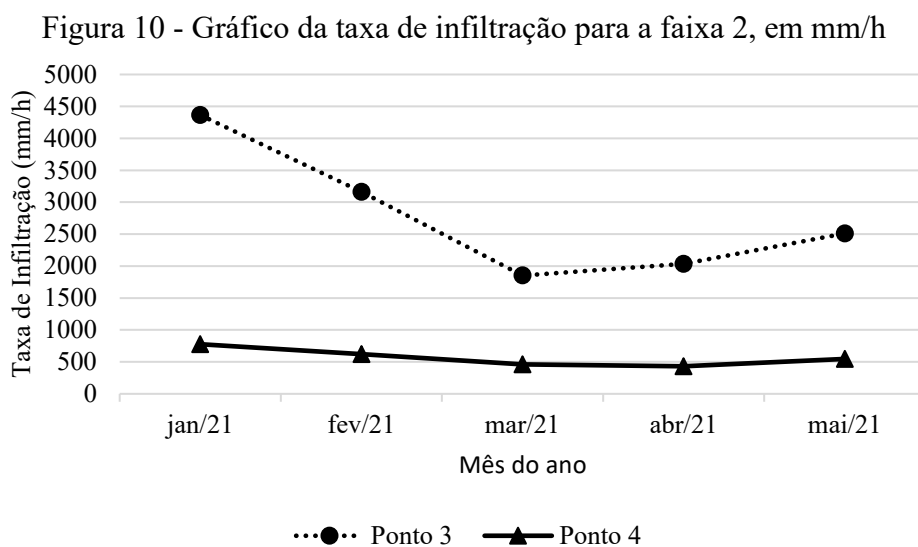
Para uma análise comparativa visual, são expostas, na figura 9, o aspecto da faixa 1 próximo ao ponto 2, em que a primeira imagem demonstra a situação do pavimento antes do processo de manutenção com o uso de jato de água de alta pressão com sucção, e a segunda imagem demonstra a situação após aplicado o método. É possível verificar uma elevada redução de sedimentos argilosos no pavimento, que são extremamente prejudiciais para a infiltração de água através de seus poros.

Figura 9 - Aspecto da faixa 1 próxima ao ponto 2 antes e após a manutenção



O gráfico da figura 10 apresenta os dados de infiltração da faixa 2 do pavimento, aplicando-se o método de manutenção apenas com jato de água de alta pressão. No quinto ponto (mai/21), que corresponde a verificação após a limpeza, verificou-se um leve aumento na taxa de infiltração do pavimento, porém não superior ao observado no método aplicado para a faixa 1, que combina o jato de água de alta pressão com sucção. Em comparação com o estudo realizado por Strieder (2021), esta faixa possuía uma taxa de infiltração média de 28.286 mm/h, medida logo após a construção do pavimento. É importante observar a diferença entre os resultados dos Pontos 3 e 4, resultante da heterogeneidade das características físicas do pavimento (densidade e porosidade). Além disso, há um local nessa faixa com elevada desagregação e porosidade.

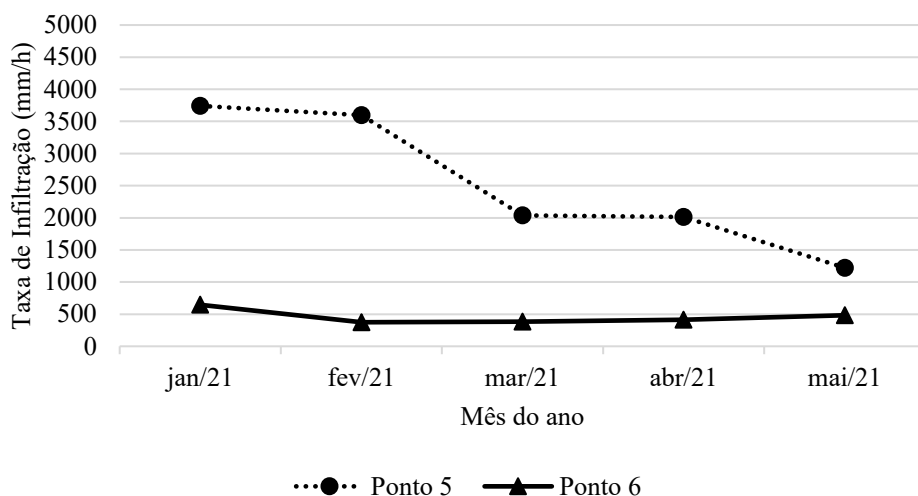
Esses fatos explicam a elevada diferença em relação ao resultado obtido por Strieder (2021), além da colmatação.



Durante a execução da manutenção com jato de água, verificou-se a necessidade de manter um ângulo entre o jato de água e a pista inferior a 45°. Observou-se que quanto maior o ângulo, ou seja, mais direcionado é o fluxo de água a um ponto do pavimento, acarreta desprendimento dos agregados. Desta forma, deve-se regular e realizar este método de manutenção com cuidado, visto que o processo de degradação por abrasão do pavimento é até mais prejudicial que o de colmatação, por não se tratar de um processo reversível.

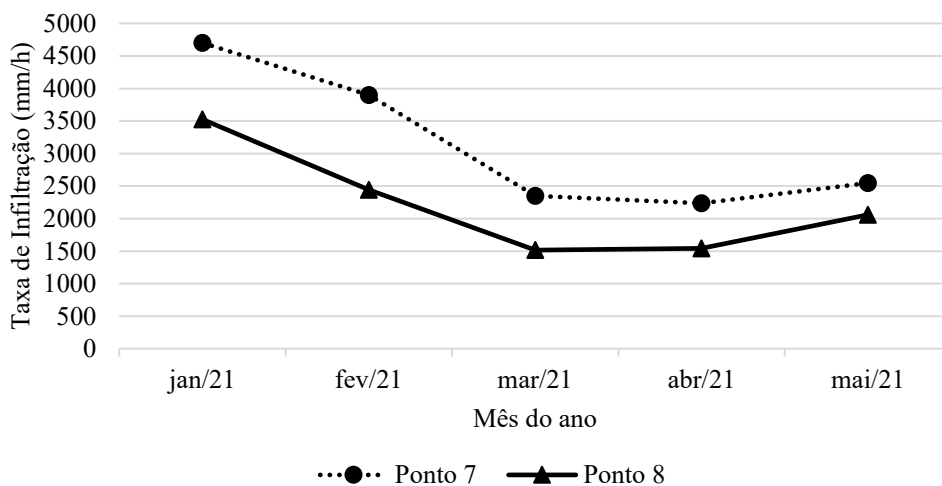
A figura 11 apresenta os dados de infiltração da faixa 3 do pavimento, aplicando-se o método de manutenção de molhagem com posterior varredura. Não foi observada nenhuma melhora nas taxas de infiltração do pavimento com a aplicação deste método. Inclusive, para o ponto 5, houve até mesmo a piora da taxa de infiltração. Este resultado está de acordo aqueles obtidos por Baladès et al. (1995), que demonstraram que este método acarretou a piora das taxas de infiltração nos pavimentos permeáveis por eles estudados. Para esta faixa, Strieder (2021) atestou uma taxa de infiltração de 7.022 mm/h logo após a construção do pavimento. Assim como na Figura 9, além da queda da taxa de infiltração ao longo do tempo, observa-se a divergência entre os resultados dos pontos 5 e 6.

Figura 11 - Gráfico da taxa de infiltração para a faixa 3, em mm/h



A figura 12 apresenta os dados de infiltração da faixa 4 do pavimento, aplicando-se o método de manutenção de varredura manual com posterior sucção. Observou-se um leve aumento das taxas de infiltração da faixa, porém não de maneira significativa, sem retornar para patamares próximos ao verificado inicialmente. Em comparação com o estudo realizado por Strieder (2021), esta faixa possuía uma taxa de infiltração média de 4.435 mm/h, medida logo após a construção do pavimento.

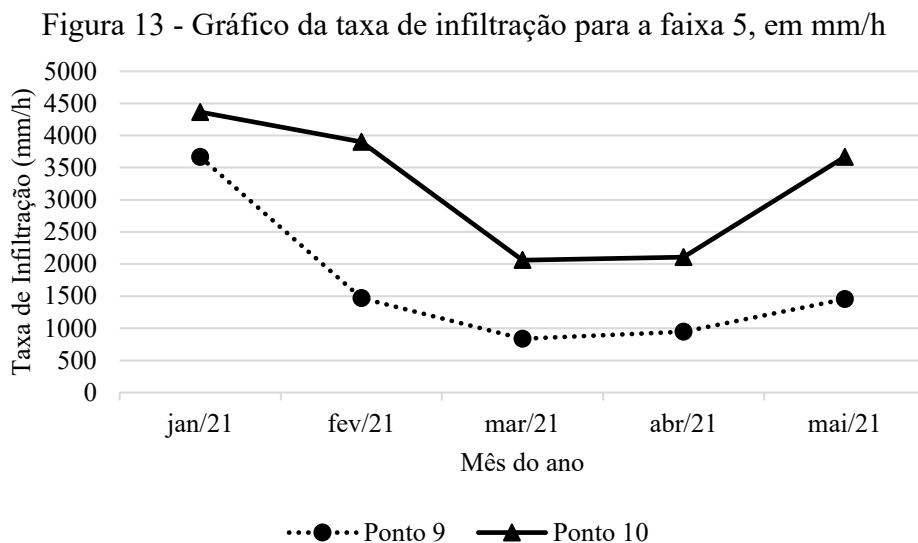
Figura 12 - Gráfico da taxa de infiltração para a faixa 4, em mm/h



Anterior ao processo de manutenção realizados nas faixas 3 e 4, temia-se que o método de varredura acarretasse no aumento do processo de degradação por abrasão do pavimento, devido à elevada fricção que ocorre neste tipo de manutenção. Todavia, não foram constatadas grandes perdas por abrasão durante a sua execução. Cabe a recomendação de se executar movimentos contínuos, não bruscos e sem esfregação durante a varredura. Além disso, foi verificado através de inspeção visual, que o processo de aplicação de jato de água de alta pressão ocasionou perdas por abrasão muito superiores àquelas com varredura.

A figura 13 representa os dados de infiltração da faixa 5 do pavimento, aplicando-se o método de manutenção de sucção. De ponto de vista visual, esta faixa possuía o maior processo abrasivo em relação às demais faixas. A manutenção com o uso de sucção se mostrou efetiva para a

retirada dos detritos de concreto proveniente do seu processo de degradação por abrasão. Em comparação com o estudo realizado por Strieder (2021), esta faixa possuía uma taxa de infiltração média de 18.485 mm/h, medida logo após a construção do pavimento.



Para uma análise comparativa visual, são expostas, na figura 14, o aspecto da faixa 5 próximo ao ponto 10, em que a primeira imagem demonstra a situação do pavimento antes do processo de manutenção com o uso de sucção, e a segunda imagem demonstra a situação após aplicado o método. É possível verificar uma elevada redução de sedimentos de concreto proveniente de processos abrasivos sobre o pavimento.

Figura 14 - Aspecto da faixa 5 próxima ao ponto 10 antes e após a manutenção

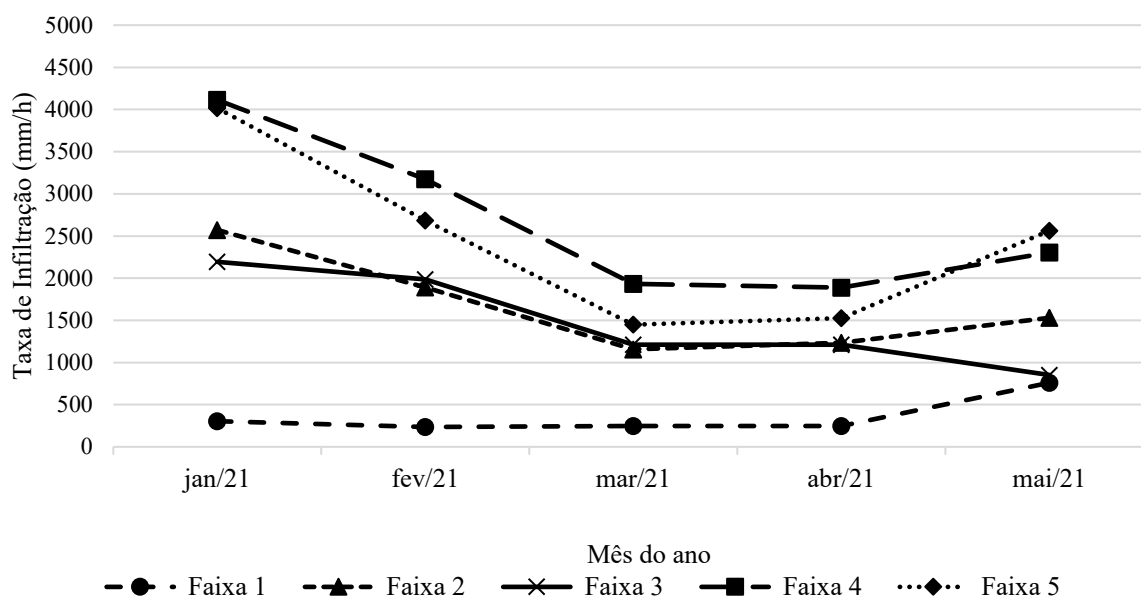


De forma sintética, foi calculada a média de taxa de infiltração para cada uma das faixas, sendo expostos seus valores e resultados na tabela 1 e figura 15.

Tabela 1 - Taxa de infiltração média por faixa em cada mês, em mm/h

Faixa	jan/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21
1	304,39	235,46	245,56	247,47	759,66
2	2571,14	1892,39	1156,33	1234,29	1528,64
3	2193,68	1984,60	1211,18	1212,94	852,40
4	4113,55	3172,81	1932,93	1888,33	2303,28
5	4016,16	2683,88	1448,64	1526,26	2561,03

Figura 15 - Taxa de infiltração média por faixa, em mm/h



De forma geral, verificou-se: (a) redução das taxas de infiltração das faixas do pavimento nos meses iniciais da análise. Assim, com os resultados obtidos, pode-se afirmar que em um pavimento de concreto permeável com porosidade de cerca de 20% e espessura de média de 18 cm, o processo de colmatação age de forma rápida desde o início da liberação do pavimento ao uso, o que requer que este pavimento receba manutenção rotineira e preventiva desde o início, reduzindo o agravamento do seu processo de colmatação. (b) apenas o método de jato de água de alta pressão com posterior sucção conseguiu garantir ao pavimento uma taxa de infiltração maior do que a verificada no primeiro ensaio, conforme dado obtido na faixa 1, correspondendo a uma infiltração 150% superior. (c) o método de manutenção com o uso de sucção se mostrou efetivo na limpeza dos detritos provenientes do processo de abrasão do pavimento, comprovado pelo resultado obtido no ensaio da faixa 5. (d) todas as faixas tiveram aumento de sua taxa de infiltração, com exceção da faixa de número 3, ocorrendo a diminuição da taxa de infiltração após feita a manutenção com molhagem e posterior varrição. Entretanto, apenas o ponto 10 possui a taxa de infiltração superior a 1 mm/s, ou seja, 3600 mm/h, parâmetro determinado pela norma NBR 16416 (ABNT, 2015) para pavimentos recém construídos.

Desde o início dos ensaios, entendia-se que haveriam diferenças nas taxas de infiltração entre um mês e o outro que poderiam ser resultados de uma série de fatores, não apenas da colmatação, mas da interferência humana nos experimentos, por exemplo. Para amenizar esta variável, todos os ensaios em todos os meses foram realizados pela mesma pessoa. Além disso, há a fuga de água em alguns pontos do anel de infiltração. Embora a selagem não tenha sido 100% efetiva, recomenda-se a utilização da massa de calafetar para o preenchimento dos vazios entre o anel de infiltração e o pavimento.

Ademais, deve-se levar em consideração que os pontos estudados por Strieder (2021) não são os mesmos pontos verificados neste estudo. Desta forma, considerando a heterogeneidade de todo o pavimento, até mesmo de pontos de mesma faixa, o valor obtido pelo estudo de Strieder deve ser apenas utilizado como parâmetro. Além disso, mesmo no estudo de Strieder verifica-se uma grande variabilidade de resultados e elevado desvio padrão para pontos de mesma faixa. Em relação aos dados de precipitação obtidos para Porto Alegre, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o mês de abril de 2021 foi muito pouco chuvoso, obtendo um acumulado de 27 mm para todo o mês. Este valor é inferior à média histórica para o mês, de 107,3 mm. Os dados de infiltração se manterem similares àqueles obtidos no final do mês de março para todas as faixas estudadas podem estar relacionados a este fato, indicando o efeito das chuvas no processo de colmatção da pista experimental em análise.

Para a análise dos dados obtidos, assim como para o monitoramento das taxas de infiltração do pavimento, pode-se realizar uma comparação entre os ensaios de infiltração realizados através do que determina a ASTM C1701/C1701M (ASTM, 2017) com o que determina a norma NBR 16416 (ABNT, 2015), determinando um coeficiente de condutividade hidráulica superior a 1 mm/s. Porém, é importante salientar que a norma exige isso para pavimentos recém construídos, que não é o caso do pavimento em análise neste estudo. Deste modo, mesmo inferior a este parâmetro, o pavimento ainda é permeável, e o que muda é o tempo em que ele leva para infiltrar a água.

Este parâmetro definido pela norma evidencia a necessidade de manutenção no pavimento desde os meses iniciais da construção do mesmo, pois foi verificado uma colmatção crescente no pavimento nos meses iniciais de análise, enquanto o pavimento deste estudo passou muitos meses sem receber nenhum tipo de manutenção. Além disso, verifica-se a necessidade em aplicar as manutenções de maneira frequente.

Os métodos de manutenção verificados, embora tenham apresentado uma melhora na taxa de infiltração total do pavimento, não foram suficientes para resgatar as taxas de infiltração do pavimento recém construído (Strieder, 2021).

Por fim, deve-se lembrar que o solo em que está construído o pavimento deste estudo, é revestido por uma membrana impermeável, assim a colmatção é possivelmente apenas na parte superficial do revestimento, não havendo uma colmatção de base. Isto justifica a utilização de uma manutenção superficial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pavimentos de concreto permeáveis possuem efetividade comprovada por diversos estudos no que diz respeito à sua importância ao meio ambiente e função como revestimento de ruas e avenidas. Além disso, o reuso de agregados da construção civil deve se tornar uma realidade, pois cada vez mais lixo é gerado ao meio ambiente e se aproximando de esgotar fontes não renováveis.

Dito isso, deve-se conscientizar no que diz respeito à realização de manutenção do pavimento de concreto permeável para que o mesmo vire uma solução bem vista ao mundo. Na cultura brasileira não se tem, em geral, o costume de realizar manutenção preventiva dos materiais construídos.

No caso de pavimentos com o uso de concreto permeável, os custos referentes à sua construção e manutenção são muito inferiores se comparado aos custos para a construção de pavimentos convencionais com sistemas complexos de canalização da água da chuva, o que não é necessário em um pavimento de concreto permeável em solos que possibilitam que a água da chuva seja drenada através dele.

Um monitoramento contínuo das taxas de infiltração do pavimento deve ser realizado para que se indique a necessidade de manutenção. Eventualmente, principalmente após eventos extremos

como no caso de temporais, deve-se verificar as condições visuais do pavimento para analisar se não houve muito depósito de sujeira durante o evento e, neste caso, realizar uma manutenção. Em suma, a colmatação age sobre o pavimento de concreto permeável de maneira rápida desde a sua liberação ao tráfego, e locais com maior incidência de vegetações e de chuva podem possuir maiores potenciais de colmatação. Assim, a manutenção deve ser aplicada desde o início da liberação do pavimento ao tráfego e de maneira frequente durante o uso, a fim de se manter a taxa de infiltração do pavimento em níveis próximos ao definido por norma. Deve-se escolher métodos de manutenção voltados ao tipo de sujeira que é incorporada no pavimento. Para colmatação ocasionada por sedimentos finos, como é o caso da argila, recomenda-se a manutenção com jato de água de alta pressão combinada com sucção, enquanto para colmatação ocasionada por sedimentos mais grossos, como aqueles gerados pelo processo de abrasão do pavimento, recomenda-se a manutenção com o uso de sucção.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 522.1-13: Specification for Pervious Concrete Pavement. **American Concrete Institute Committee 522**, Farmington Hill, MI, United States of America. 2013.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 522R. Report on Pervious Concrete. **American Concrete Institute Committee 522**, [s. l.], n. West Conshohocken, PA, United States of America, p. 42, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1701/C1701M**: Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. West Conshohocken, PA, United States of America, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14545. Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. **NBR 14545**, [s. l.], p. 12, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16416. Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. **NBR 16416**, [s. l.], n. Rio de Janeiro, 2015.
- BALADÈS, J.D.; LEGRET, M.; MADIEC, H. Permeable pavements: Pollution management tools. **Water Science and Technology**, 32, 49-56, 1995.
- BATEZINI, R. Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves. **Universidade de São Paulo**, [s. l.], 2013.
- BATEZINI, R. et al . Experimental appraisal for characterizing laboratorial and field performance parameters of pervious concrete pavement. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 177-194, abr. 2021.
- BERRY, B. M.; SUOZZO M. J.; IAN, A. A. . D. M. M. Properties of Pervious Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregate. [s. l.], p. 1–16, 2012.
- BHUTTA, M.; HASANAH, N.; FARHAYU, N.; HUSSIN, M. . T. M. M. . M. J. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 47, n. October, p. 1243–1248, 2013.
- CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento superficial urbano**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e

Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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

CHEN, J., CHU, R., WANG, H., ZHANG, L., CHEN, X., DU, Y. Alleviating urban heat island effect using high-conductivity permeable concrete pavement, **Journal of Cleaner Production**, v. 237, 2019.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº. 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, de 05 de julho de 2002**. Diário Oficial da União, n. 136, de 17 de julho de 2002.

COSTA, F. B. P.; LORENZI, A.; HASELBACH, L.; SILVA FILHO, L. C. P. Best practices for pervious concrete mix design and laboratory tests Boas práticas para dosagem e testes laboratoriais. **Ibracon Structures and Materials Journal**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 1151–1159, 2018.

DEBNATH, B.; SARKAR, P. P. Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review. **International Journal of Pavement Engineering**. p. 1-16, 2018.

DRAKE, J. A. P., BRADFORD, A. Assessing the potential for restoration of surface permeability for permeable pavements through maintenance. **Water Science and Technology**. v. 68 (9), p. 1950-1958, 2013.

EL-HASSAN, H., KIANMEHR, P., ZOUAOU S. Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 164-175, 2019.

GAEDICKE, C.; MARINES, A.; MIANKODILA, F. Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 68, p. 701–708, 2014.

HASELBACH, L., POOR, C., TILSON, J. Dissolved Zinc and Copper Retention from Stormwater Runoff in Ordinary Portland Cement Pervious Concrete, **Construction and Building Materials**, v. 53C, p. 652-657, 2014.

HASELBACH, L. M. Potential for Clay Clogging of Pervious Concrete under Extreme Conditions. **Journal of Hydrologic Engineering**, 15(1), 67–69, 2010.

HASELBACH, L. M., FREEMAN, R. M. Vertical porosity distributions in pervious concrete pavement. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 103, n. 6, p. 452–458, 2006a.

HASELBACH, L. M., VALAVALA, S., MONTES, F. Permeability predictions for sand-clogged Portland cement pervious concrete pavement systems. **Journal of Environmental Management**, 81(1), 42–49, 2006b.

HASELBACH, L. M., WERNER, B., DUTRA, V., SCHWETZ, P., SILVA FILHO, L.C.P., BATEZINI, R., CURVO, F., BALBO, J. Estimating Porosity of In Situ Pervious Concrete Using Surface Infiltration Tests. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 45 (5), p. 1726–1735, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Perfil dos Municípios Brasileiros (MUNIC, 2017). **IBGE**, [s. 1], v. 155, p. 296-306, 2017.

- JENNIFER A. P. DRAKE, ANDREA BRADFORD, JIRI MARSALEK; Review of environmental performance of permeable pavement systems: state of the knowledge. **Water Quality Research Journal** 1, 48 (3): 203–222, August 2013.
- KAYHANIAN, M. et al. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, 95 (1), 114-553, 2012.
- KIA, A. et al. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 221-233, 2017.
- LAMB, G. S. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável**. 2014. (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LORENZI, A., HASELBACH, L., SILVA FILHO, L. C. P. da, PESSUTTO, Â. S., BIDINOTTO, G. B. Thermal profiles in pervious concrete during summer rain simulations. **Revista Matéria**. Rio de Janeiro, v. 23(3), 2018.
- PARK, S. B., SEO, D. S., & LEE, J. Studies on the sound absorption characteristics of porous concrete based on the content of recycled aggregate and target void ratio. **Cement and Concrete Research**, 35(9), 1846–1854, 2005.
- PIERALISI, R.; CAVALARO, S.H.P.; AGUADO. A Advanced numerical assessment of the permeability of per-vious concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 149-160, 2017.
- RAZZAGHMANESH, M., & BEECHAM, S. A Review of Permeable Pavement Clogging Investigations and Recommended Maintenance Regimes. **Water**, 10(3), 337, 2018.
- SANDOVAL, G. F. B., GALOBARDES, I., DE MOURA, A. C., TORALLES, B. M. Hydraulic behavior variation of pervious concrete due to clogging. **Case Studies in Construction Materials**, v.13, 2020a.
- SANDOVAL, G. F. B., DE MOURA, A. C., JUSSIANI, E. I., Andrello, A. C., TORALLES, B. M. M. Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging. **Construction and Building Materials**, v. 248, 2020b.
- SONEBI, M.; BASSUONI, M.; YAHIA, A. Pervious Concrete: Mix Design, Properties and Applicants. **RILEM Technical Letters****RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 109-115, 2016.
- STRIEDER, H. L. **Estudo do uso resíduos da construção civil como agregados em concreto permeável para pavimentos**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre, 2021.
- TAM, V. W.Y.; MAHFOOZ S.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 172, p. 272–292, 2018.
- WELKER, A. L. et al. Examination of the material found in the pore space of two permeable pavements. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. 139, 278-284, 2013.
- WINSTON, R. J. et al. Maintenance measures for preservation and recovery of permeable pavement surface infiltration rate – The effects of street sweeping, vacuum cleaning, high pressure washing, and milling. **Journal of Environmental Management**, 169, 132–144, 2016.

WISCONSIN DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. **Permeable Pavements, Standard 1008**; Wisconsin Department of Natural Conservation Practice Standard: Madison, WI, USA, 2014.

XIE, N., AKIN, M., SHI, X. Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1605-1621, 2018.

YAP, S. P. et al. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], p. 155–165, 2018.

ZHANG, Y., LI, H., ABDELHADY, A., YANG, J. Effect of different factors on sound absorption property of porous concrete. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 87, 2020.

ZHONG, R., LENG, Z., POON, C. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. **Construction and Building Materials**, v.183, p. 544-553, 2018.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de realizar meu agradecimento às professoras Ângela Gaio Graeff e Vanessa Pasa Dutra por todo o suporte, conhecimento e direcionamento da pesquisa, à engenheira Helena Lunkes Strieder, idealizadora e companheira de toda a pesquisa e construção do trecho experimental de concreto permeável, proporcionando o surgimento deste artigo. Além disso, agradecimento à CNPQ, que tornou financeiramente possível a construção do trecho.