

## ***Efeito da percolação da água do escoamento superficial sobre a colmatagem de pavimentos de concreto permeável com diferentes sistemas de infiltração da água armazenada***

Visando o desenvolvimento de tecnologias que acrescentem na melhoria do saneamento básico de modo a promover melhor desempenho no manejo de águas pluviais das cidades, esse estudo teve por objetivo analisar o efeito da percolação do escoamento superficial sobre a colmatagem de pavimentos de permeável com diferentes concretos permeáveis e sistemas de infiltração da água armazenada, com isso compreender como o coeficiente de permeabilidade e, consequentemente, a vida útil dos pavimentos permeáveis, são afetados ao longo do tempo. Para tanto, nove diferentes tipos de pavimentos permeáveis de concreto permeável foram dimensionados e construídos. A diferença entre eles foi no índice de vazios dos concretos permeáveis dosados pelo método de Nguyen et al. (2014) com 15, 20 e 25%, bem como o sistema de infiltração dos pavimentos, sendo o de infiltração total e o sem infiltração. A camada de base (reservatório) dos pavimentos permeáveis foi dimensionada segundo Silveira et al. (2007) e a camada de subleito segundo Becker (2018) e Zimmer (2020), tendo os pavimentos sido montados dentro de tubos rígidos de PVC com 20 cm de diâmetro. A água sintética utilizada na simulação de chuva foi desenvolvida a partir de uma mistura de água do sistema de abastecimento público, solo e erva mate. O experimento foi realizado em triplicatas para cada pavimento permeável de concreto permeável e constituiu em períodos totais de simulação acelerada de chuva, utilizando a metodologia de Rezende et al. (2016), equivalente a 12 anos para os pavimentos permeáveis de concreto permeável com infiltração total e 26 anos para os pavimentos permeáveis sem infiltração. O coeficiente de permeabilidade de cada material constituinte dos pavimentos permeáveis de concreto permeável foi medido separadamente, sendo: camada de subleito, camada de base (reservatório) e os concretos permeáveis com 15, 20 e 25% de índice de vazios. O coeficiente de permeabilidade inicial dos pavimentos permeáveis com infiltração total ficou próximo ao coeficiente de permeabilidade do agregado miúdo utilizado para compor a camada de subleito, e os pavimentos permeáveis sem infiltração tiveram seus coeficientes de permeabilidade iniciais próximos aos dos concretos permeáveis utilizados nas camadas de revestimento. O tempo equivalente a colmatagem para os pavimentos permeáveis com infiltração total foi de 6,5, 7,8 e 9 anos para os que continham os concretos permeáveis com 15, 20 e 25% de índice de vazios, em contrapartida os pavimentos permeáveis sem infiltração tiveram seu tempo de colmatagem equivalente em 16,2, 18,1 e 19,4 anos para a mesma ordem de índice de vazios dos concretos permeáveis. A camada de subleito é a principal responsável da diminuição/término da vida útil dos pavimentos permeáveis, sendo assim imprescindível uma avaliação prévia da condutividade hidráulica do solo em que será instalado o pavimento permeável, a fim de poder escolher qual o melhor sistema de infiltração a ser adotado.

**Palavras-chave:** Pavimento permeável; Colmatagem; Coeficiente de permeabilidade.

## ***Effect of percolation of surface runoff water on the clogging of permeable pavements with different permeable concretes and infiltration systems of stored water***

Aiming at the development of technologies that add to the improvement of basic sanitation to promote better performance in the management of rainwater in cities, this study aimed to analyze the effect of percolation of surface runoff on the clogging of permeable pavements with different permeable concretes and infiltrations systems of stored water, with this understand how the permeability coefficient and, consequently, the service life of permeable pavements, are affected over time. For this purpose, nine different types of permeable pavements with different permeable concretes were sized and constructed. The difference between them was in the void rates of permeable concretes dosed by the method of Nguyen et al. (2014) with 15, 20 and 25%, as well as the pavement infiltration system, being the total infiltration system and the without infiltration. The base layer (reservoir) of the permeable pavement was dimensioned according to Silveira et al. (2007) and the subbed layer according to Becker (2018) and Zimmer (2020), and the permeable pavement were mounted inside PVC rigid pipes with 200 mm in diameter. The synthetic water used in the rain simulation was developed from a mixture of water from the public supply system, soil and yerba mate. The experiment was carried out in triplicates for each permeable pavement and consisted of total periods of accelerated rain simulation, using the methodology of Rezende et al. (2016), equivalent to 12 years for permeable pavement of permeable concrete with total infiltration and 26 years for permeable floors without infiltration. The permeability coefficient of each constituent material of permeable concrete permeable pavement was measured separately, being: subbed layer, base layer (reservoir) and permeable concrete with 15, 20 and 25% void rates. The initial permeability coefficient of permeable pavement with total infiltration was close to the permeability coefficient of the kid aggregate used to make up the subbed layer, and the permeable pavements without infiltration had their initial permeability coefficients close to those of the permeable concretes used in the coating layers. The time equivalent to clogging for permeable floors with total infiltration was 6.5, 7.8 and 9 years for those containing permeable concretes with 15, 20 and 25% of void rates, on the other hand, the permeable pavements without infiltration had their equivalent clogging time in 16.2, 18.1 and 19.4 years for the same order of void index of permeable concretes. The subbed layer is the main responsible for the reduction/end of the life of permeable pavements, thus being essential a prior evaluation of the hydraulic conductivity of the soil in which the permeable pavement will be installed, in order to be able to choose the best infiltration system to adopt.


**Keywords:** Permeable pavement; Clogging; Permeability coefficient.


Topic: **Desenvolvimento, Sustentabilidade e Meio Ambiente**

Received: **06/02/2022**

Approved: **25/02/2022**

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Angelo Kuskowski   
Universidade Regional de Blumenau, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/2536204895335658>  
<http://orcid.org/0000-0002-7098-4493>  
[angelokzw@gmail.com](mailto:angelokzw@gmail.com)

Ivone Gohr Pinheiro   
Universidade Regional de Blumenau, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/6522200645618540>  
<http://orcid.org/0000-0002-3552-4352>  
[ivonegp@furb.br](mailto:ivonegp@furb.br)



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0014

### **Referencing this:**

KUSZKOWSKI, A.; PINHEIRO, I. G.. Efeito da percolação da água do escoamento superficial sobre a colmatagem de pavimentos de concreto permeável com diferentes sistemas de infiltração da água armazenada. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.2, p.152-166, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.002.0014>

## **INTRODUÇÃO**

As constantes transformações observadas no meio ambiente são capazes de evidenciar uma sucessão de estados que se alternam entre situações de não-equilíbrio e equilíbrio que resultam diferentes paisagens, uma paisagem é, então, a expressão de processos compostos de uma sequência de mudanças que ocorreu em uma determinada fração de tempo, as mudanças ocorreram e ainda ocorrem, desencadeadas pela ação de agentes naturais em um passado distante e agentes naturais e humanos no tempo presente (SANTOS et al., 2007).

A urbanização é um dos processos mais impactantes sobre o meio natural, a começar pela poluição dos recursos hídricos, a degradação dos mananciais, o uso humano desmedido de água, a retirada da mata ciliar ao longo dos rios, a total impermeabilização do solo, a canalização e a retificação dos cursos fluviais, provocando a ampla artificialização da drenagem em área urbana (THOMASZIELLO, 2007).

O meio ambiente é formado de sistemas, que podem ser descritos como um conjunto de elementos que mantêm relações entre si, o solo e a água são elementos estruturais desse meio que mantêm relações entre si através de fluxos e ciclos, as ligações entre os elementos do sistema resultam em um grau de organização, num certo espaço e num determinado tempo que quando ocorre a interferência do ser humano com suas atividades em um dado elemento estrutural, desencadeia-se alterações por toda cadeia a que esse elemento pertence podendo alterar a organização dos sistemas (SANTOS et al., 2007).

A mudança de relação entre os elementos estruturais do meio ambiente, solo e água, devido a ocupação do ser humano pode ser observada em dias de muita chuva com alagamentos de vias e enchentes, trazendo a reflexão sobre a importância da realização do adequado planejamento dos ambientes urbanos.

Superfícies impermeáveis, como áreas asfaltadas, estacionamentos pavimentados, coberturas das edificações, produzem pouca infiltração e muito escoamento superficial, desta forma, tem-se que a impermeabilização das superfícies é o principal fator de agravamento das enchentes, enquanto a manutenção de superfícies permeáveis reduz o risco de ocorrência de enchentes (PINHEIRO, 2007).

Um exemplo de superfícies permeáveis são os pavimentos permeáveis que possuem espaços livres em sua estrutura por onde a água pode escoar, ser armazenada, podendo infiltrar no solo e/ou ser transportada através de sistema auxiliar de drenagem (FERGUSON, 2005). Este tipo de pavimento busca reduzir o volume de água referente ao escoamento superficial e, por consequência, reduzir a solicitação do sistema de drenagem urbana e a probabilidade de enchentes, como efeitos complementares tem-se a melhora da qualidade de água infiltrada por carrear menor quantidade de poluição difusa e a contribuição para a recarga (FERGUSON, 2005).

Legislações municipais têm sido aprovadas visando à retenção na fonte dos excessos de escoamento superficiais, provocadas pela impermeabilização do solo, como a implantação de áreas de estacionamentos e coberturas das edificações (PINHEIRO, 2007). Ainda segundo o autor, essa preocupação é mais usual fora do Brasil, em países desenvolvidos, sendo que em vários deles é obrigatória a retenção dos excedentes de escoamentos superficiais resultante do asfaltamento das ruas e construção de prédios.

Para reter esses excedentes do escoamento superficial pode-se utilizar o sistema de pavimentos permeáveis que segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015) é estruturado em quatro camadas sendo: camada de sub-base permeável, base permeável, camada de assentamento permeável (quando for o caso) e revestimento permeável. Essas camadas, segundo a mesma norma, devem ser dimensionadas para suportar o carregamento do tráfego, distribuir os esforços no subleito e permitir a percolação de água.

A infiltração, segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), é um processo pelo qual a água superficial penetra no subleito, movendo-se por ação da gravidade através dos vazios interligados do solo até atingir uma camada impermeável, formando um lençol d'água. A norma ainda define três diferentes tipos de infiltração para o pavimento permeável de concreto permeável, que são: - **Infiltração total**: toda a água precipitada alcança o subleito e infiltra; - **Infiltração parcial**: parte da água alcança o subleito e se infiltra, porém, parte da água fica temporariamente armazenada na estrutura permeável, sendo depois removida por um dreno; - **Sem infiltração**: a água precipitada fica temporariamente armazenada na estrutura permeável e não infiltra no subleito, sendo depois removida por um dreno.

A colmatagem dos poros dos pavimentos permeáveis, ao longo do tempo a infiltração do escoamento superficial pode se tornar nula, fazendo com que o pavimento acabe por se tornar uma estrutura impermeável à medida que perde sua capacidade drenante (VIRGILIIS, 2009).

Considerando esse problema e entendendo que o pavimento permeável é composto por diversas camadas sujeitas ao efeito da colmatagem ao longo do tempo, é evidenciado o bom funcionamento e tempo de vida dos pavimentos permeáveis para o manejo das águas pluviais superficiais e a qualidade ambiental, fazendo necessário compreender como o fenômeno da colmatagem ocorre por conta da ação das águas do escoamento superficial.

A utilização de pavimentos permeáveis é uma alternativa de desenvolvimento urbano de baixo impacto negativo ao meio ambiente para controlar o volume de escoamento de águas pluviais e, conseqüentemente, diminuir a descarga de grandes vazões e poluentes nos corpos d'água receptores (KAMALI et al., 2017).

O concreto permeável é exposto ao fenômeno da colmatagem, sendo que dependendo do tipo de sedimento pode-se diminuir a permeabilidade do material em até 100% (SANDOVAL et al., 2020) fazendo com que o pavimento se torne praticamente impermeável. Assim, entender a colmatagem relacionado aos diferentes concretos permeáveis da camada de revestimento, bem como os diferentes sistemas de infiltração da água armazenada é fundamental para avaliar e prever o desempenho dos pavimentos permeáveis para que todos os benefícios supracitados se tornem realmente eficientes.

Alguns estudos observaram que a colmatagem geralmente ocorre na camada de revestimento do pavimento permeável (KAYHANIAN et al., 2012; YONG et al., 2013), enquanto outros descobriram que as partículas têm a mesma probabilidade de colmatar dentro do concreto permeável ou solo subjacente (CHOPRA et al., 2010; MATA et al., 2012). Essas variedades de descobertas sugerem que não há um único

local ou profundidade dentro do pavimento permeável onde geralmente ocorre a colmatagem (KIA et al., 2017).

O padrão de deposição real dependerá do tamanho das partículas responsáveis pela colmatagem em relação ao tamanho dos poros no concreto permeável (KIA et al., 2017). As partículas que são muito maiores do que os poros irão reter na superfície superior, formando um cobertor ou “cake” como camada de deposição. Partículas mais finas tendem a ficar presas dentro do concreto permeável longe da superfície. Partículas muito finas, como silte e argila, podem ser transportadas, podendo colmatar a sub-base composta de agregado graúdo e/ou solo do subleito (MATA, 2008; MATA et al., 2012).

Dessa forma, dada sua importância para o manejo das águas pluviais superficiais e a qualidade ambiental faz-se necessário melhor compreender a ocorrência da colmatagem na camada de revestimento (variando a porosidade do concreto) e a do subleito (variando os tipos de infiltração), a fim de entender como a colmatagem ocorre por conta da ação das águas do escoamento superficial.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

A função técnica do pavimento permeável é servir como elemento de retenção na fonte, reduzindo os picos de vazão veiculadas para rede de drenagem e promover o aumento do tempo de concentração da bacia, sendo que o desempenho hidráulico do pavimento está associado ao tipo de material utilizado no revestimento (concreto permeável, asfalto permeável), suas propriedades hidrodinâmicas e da periodicidade de manutenção do sistema (CANHOLI, 2015).

O método de Nguyen et al. (2014) é um método de dosagem analítico que se baseia em quantificar a pasta de cimento mínima necessária para que o agregado seja revestido, sem que haja uma quantidade de pasta pequena a ponto de interferir negativamente na resistência mecânica do concreto, ou elevada de modo a obstruir os poros interferindo assim no coeficiente de permeabilidade (CARLS, 2018).

A colmatagem é a principal causa da redução do coeficiente de permeabilidade nos pavimentos permeáveis, sendo que ela ocorre quando a infiltração de material particulado junto com a água da chuva gera acúmulo e deposição desses nos poros dos pavimentos permeáveis (ZHANG et al., 2018).

Este processo ocorre uma vez que existem partículas presentes no escoamento que percola pelo pavimento permeável, que muitas vezes, por conta do tráfego, são quebradas em partículas ainda menores, que acabam se aderindo, secando e se acumulando nas paredes dos poros dos pavimentos permeáveis. Esse processo reduz o coeficiente de permeabilidade e pode causar eventualmente um aumento no escoamento superficial, uma vez que a quantidade de água infiltrada no pavimento irá diminuir (KIA et al., 2017).

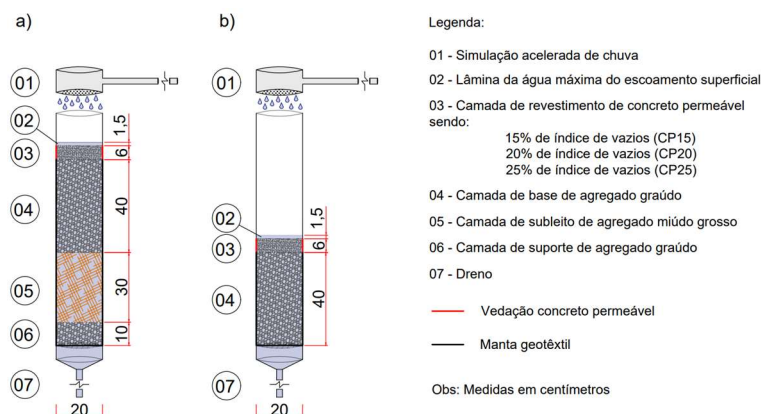
Diferentes estudos apontam variedades de descobertas que não há um único local ou profundidade dentro do pavimento permeável onde geralmente ocorre a colmatagem (KIA et al., 2017). O padrão de deposição real dependerá do tamanho das partículas responsáveis pela colmatagem em relação ao tamanho dos poros no pavimento permeável de concreto (KIA et al., 2017). As partículas que são muito maiores do que os poros irão reter na superfície superior da camada de revestimento, partículas mais finas tendem a

ficar presas dentro da camada de revestimento e partículas muito finas como silte e argila (partículas coloidais), podem ser transportadas, podendo colmatar a camada de subleito (MATA, 2008; MATA et al., 2012).

Ainda tratando da colmatagem de meios porosos tanto a química da solução quanto a hidrodinâmica são conhecidas por alterar a permeabilidade dos meios porosos contendo partículas coloidais. Partículas em suspensão no escoamento são transportadas e depositadas através de todas as camadas do pavimento permeável (MATA, 2008; MATA et al., 2012). Diferentes mecanismos hidrodinâmicos estão envolvidos na deposição das partículas em suspensão nas superfícies dos grãos que constituem as camadas dos pavimentos permeáveis (KEIR et al., 2009), para melhor entendimento este por sua vez pode ser classificado como um filtro físico, apesar de não ser a principal função do pavimento permeável a filtragem da água.

O presente trabalho foi realizado em seis diferentes tipos de unidades experimentais de pavimentos permeáveis de concreto permeável (Figura 1), havendo triplicata para cada uma delas totalizando 18 unidades experimentais montadas e experimentadas com simulador acelerado de chuva, alterando a camada de revestimento de concreto permeável e o sistema de infiltração, sendo: 1 – Unidade experimental com concreto permeável com 15% de índice de vazios e sistema de infiltração total; 2 – Unidade experimental com concreto permeável com 20% de índice de vazios e sistema de infiltração total; 3 – Unidade experimental com concreto permeável com 25% de índice de vazios e sistema de infiltração total; 4 – Unidade experimental com concreto permeável com 15% de índice de vazios e sistema sem infiltração; 5 – Unidade experimental com concreto permeável com 20% de índice de vazios e sistema sem infiltração; 6 – Unidade experimental com concreto permeável com 25% de índice de vazios e sistema sem infiltração.

As unidades experimentais de pavimentos permeáveis de concreto permeável, montadas exclusivamente para este estudo, foram submetidas a simulações acelerada de chuva e tiveram seus coeficientes de infiltração e turbidez medidos em intervalos de 10 minutos para cada experimento, sendo que com a evolução temporal desses parâmetros pôde-se analisar o efeito da água do escoamento superficial sobre a colmatagem dos pavimentos permeáveis de concreto permeável.



**Figura 1:** Unidades experimentais dos pavimentos permeáveis de concreto permeável experimentados: a) Infiltração total, b) sem infiltração.

A espessura da camada de base foi dimensionada conforme método de Silveira et al. (2007), e a simulação acelerada de chuva (REZENDE et al., 2016) e para isso foi necessário calcular a precipitação média anual e a velocidade média anual do vento através de dados históricos de estações próximas ao Campus 2 da FURB.

Antes da montagem das unidades experimentais de pavimentos permeáveis de concreto permeável foi necessário realizar a caracterização dos materiais constituintes, sendo que com esses dados foram calculados os traços dos concretos permeáveis utilizados nas camadas de revestimento pelo método de Nguyen et al. (2014). Sabendo que a NBR 16416 (ABNT, 2014), tratando de sistema de infiltração total, recomenda um coeficiente de permeabilidade mínimo da camada de subleito, fez-se importante a caracterização do material escolhido para compor essa camada nas unidades experimentais, com isso foi aferido se o coeficiente de permeabilidade do material estava de acordo com a norma.

A etapa seguinte foi a concretagem das diferentes peças de concretos permeáveis (prismas, cilindros e discos) que foram submetidas a ensaios para determinar as propriedades mecânicas e hidráulicas de cada traço, sendo que os discos foram utilizados para compor as unidades experimentais de pavimento permeável.

Com a montagem das unidades experimentais de pavimentos permeáveis de concreto permeável foi iniciada a simulação acelerada de chuva, sendo que para o escoamento superficial foi utilizada água sintética feita a partir da combinação de água do sistema de abastecimento público, solo e erva mate.

### **Agregado miúdo grosso (camada de subleito)**

A tabela B.1 da NBR 16416 (ABNT, 2015) recomenda que para o sistema de infiltração total é necessário que o solo apresente um valor de coeficiente de permeabilidade maior que  $1,00 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ . Como segundo o Observatório do Desenvolvimento Regional (2009) a região de Blumenau é predominantemente formada por solo do tipo cambissolo argiloso com uma condutividade hidráulica superficial média igual a  $1,00 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$ , buscou-se, então o agregado miúdo grosso que atendessem ao solicitado pela norma.

Esse agregado graúdo grosso foi utilizado nas camadas de subleito das unidades experimentais de pavimentos permeáveis de concreto permeável com infiltração total e teve seu coeficiente de permeabilidade determinado pela lei de Darcy em permeâmetro de carga constante através do coeficiente angular da reta ajustada aos pontos experimentais, sendo que o agregado miúdo grosso apresentou coeficiente de permeabilidade igual a  $5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ , estando de acordo com o valor mínimo recomendado pela NBR 16416 (ABNT, 2015).

### **Agregado miúdo fino (concreto permeável)**

Para composição do traço de concreto permeável foi utilizada areia grossa que foi limpa e seca, antes da realização dos ensaios de caracterização e utilização nas concretagens. Esse agregado miúdo correspondeu a 6,5% do total de agregados presente nos traços dos concretos permeáveis, visto que essa quantidade possui resultados significativos na melhora da resistência mecânica do concreto permeável, sem

comprometer sua porosidade (NGUYEN et al., 2014). Os ensaios realizados para caracterizar o agregado miúdo fino foram os de determinação da massa específica na condição seca, massa específica na condição saturada de superfície seca e absorção de água conforme NBR 16916 (ABNT, 2021), determinação da composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Os resultados médios relativos ao agregado miúdo fino de massa específica na condição seca, massa específica na condição saturada de superfície seca e absorção de água, obtidos nos ensaios realizados conforme NBR 16916 (ABNT, 2021). O valor médio de massa específica encontrado foi de  $2,08 \text{ g/cm}^3$ , o valor de massa específica na condição saturada de superfície seca foi de  $2,12 \text{ g/cm}^3$  e a absorção de água do agregado miúdo fino foi de 2,11%. Foi traçada a curva granulométrica do material ensaiado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) comparada com os limites propostos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), sendo constatado que o material esteve adequado para compor os traços dos concretos permeáveis.

### **Agregado graúdo (Concretos permeáveis e camada de base/reservatório)**

O agregado graúdo utilizado para compor os traços de concretos permeáveis presentes na camadas de revestimento e utilizado para compor a camada de base/reservatório das unidades experimentais de pavimento permeável de concreto permeável foi a brita comercial 0, que foi limpa e seca antes de sua utilização nas unidades experimentais e antes da realização dos ensaios de caracterização, que foram determinação da massa unitária e volume de vazios conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), massa específica, massa específica aparente e absorção de água conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Foi constatado que a massa unitária do material foi de  $1595 \text{ kg/m}^3$ , seu índice de vazios igual a 41%, sua massa específica em condição saturado de superfície seca igual a  $2,75 \text{ g/cm}^3$ , massa específica aparente de  $2,79 \text{ g/cm}^3$  e sua absorção de água igual a 0,83%.

A curva granulométrica do agregado graúdo apresentou que o material se encontra dentro dos limites propostos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005), possuindo um diâmetro máximo característico de 12,5 mm, o que pode contribuir para a resistência mecânica do concreto permeável (ZHONG et al., 2015; IBRAHIM et al., 2014; LIAN et al., 2011). O agregado graúdo apresentou coeficiente de permeabilidade igual a  $3,5 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ , obtido pelo ensaio de permeabilidade com carga constante pela lei de Darcy.

### **Aglomerante**

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland V de alta resistência inicial (CP-V ARI), uma vez que, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), ele deve adquirir ao menos 14 MPa de resistência a compressão após 1 dia, permitindo assim uma maior facilidade em realizar a desmoldagem.

### **Análise das séries históricas de precipitação média anual e velocidade média anual do vento**

A precipitação média anual deve ser determinada pela série histórica da estação pluviométrica número 02649007, localizada na ponte Governador Adolfo Konder, no bairro central de Blumenau/SC,

(26°55'06''S; 49°03'55''O), de acordo com o site HidroWeb, essa é a estação mais próxima ao Campus 2 da FURB e possui os dados atualizados de série histórica, o cálculo da média de precipitação dos anos de 1994 a 2020 apresentou um valor médio de precipitação anual de 1711 mm.

A velocidade média anual do vento foi determinada com base nos dados da estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) código A817, localizada no município de Indaial - SC (26°55'12''S; 49°16'12''O), foi calculada a média da velocidade horária do vento com os dados compreendidos entre os dias 07/06/2019 e 06/06/2020, obtendo assim um valor aproximado de velocidade média anual do vento, a 10 m de altura, de 0,92 m.s-1.

### **Determinação da vazão do simulador de chuva e do tempo real simulado dos experimentos**

Para o determinar a vazão do simulador de chuva foi utilizada a metodologia aplicada por Rezende et al. (2016), replicada por Zimmer (2020) e para esse estudo obteve-se o mesmo valor do último autor, sendo 3 L.min-1, com isso 10 minutos de experimento corresponde a um tempo real de 0,65 anos

### **Dimensionamento da camada de revestimento de concreto permeável**

A escolha do traço do concreto permeável pelo método de Nguyen et al. (2014) foi baseada em estudos que compararam três diferentes métodos de dosagem de concretos permeáveis que foi o de Becker (2018) que analisou parâmetros de qualidade da água percolada e o estudo de Carls (2018) que mediu o coeficiente de permeabilidade, resistência mecânica e durabilidade, concluindo que o método desenvolvido por Nguyen et al. (2014) apresentou excelentes resultados de qualidade da água percolada, resistência a compressão e coeficiente de permeabilidade, podendo ser aplicado tanto com granulometria adaptada ao método quanto a comercial. Com o teste de drenagem constatou-se que a relação A/C ótima foi de 0,37, com isso foi calculado os traços demonstrados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Consumo de materiais dos concretos permeáveis.

Índice de Vazios (%)	a/c	Cimento (kg)	Água (kg)	Agregado graúdo (kg)	Agregado miúdo (kg)	Massa específica teórica (kg/m <sup>3</sup> )
15	0,37	346	128	1532	107	2113
20	0,37	326	120	1442	100	1988
25	0,37	305	113	1352	94	1864

### **Dimensionamento da camada de base (reservatório)**

A espessura da camada de base foi determinada pelo método da Equação 4 baseada no estudo de Silveira et al. (2007), sendo encontrado valor igual a 0,40 m de brita, que foi a mesma espessura utilizada nos trabalhos realizados por Becker (2018) e Zimmer (2020).

### **Camada de subleito (pavimento permeável de concreto permeável com infiltração total)**

A camada de subleito utilizada nas unidades experimentais de pavimento permeável com concreto permeável foi similar à de Becker (2018) e Zimmer (2020), sendo uma camada de 0,3 m de areia grossa



(agregado miúdo grosso) através da qual a água proveniente da camada de reservatório era exfiltrada, sob essa camada foi colocado 0,1 m de agregado graúdo como camada suporte para evitar a perda de areia durante os experimentos e por fim foi colocada manta geotêxtil entre e ao redor das camadas.

### **Ensaio de coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis**

Foram concretados 12 corpos de prova cilíndricos, sendo 4 unidades para cada traço de concreto permeável. Os corpos de prova cilíndricos possuíam dimensões iguais a 10 cm de diâmetro de base e 20 cm de altura conforme consta na NBR 5738 (ABNT, 2015). O adensamento foi realizado manualmente em 2 camadas para os três traços de concretos permeáveis, sendo: 10 golpes na primeira camada e 15 na segunda camada para o traço com 15% de índice de vazios, e 10 golpes na primeira camada e 9 golpes na segunda camada para o traço com 20% de índice de vazios, por fim foram 6 golpes na primeira camada e 5 golpes na segunda camada para o traço com 25% de índice de vazios.

Os corpos de prova foram desmoldados 48 horas após sua concretagem, em seguida foram submetidos a cura submersa por 26 dias, após isso foi realizado o ensaio de coeficiente de permeabilidade a carga variável conforme procedimento descrito na norma ACI 522 R (ACI, 2010).

### **Produção da água sintética**

Para iniciar a simulação de chuva foi necessário produzir a água sintética do escoamento superficial através de uma curva de calibração (ZIMMER, 2020) que definiu uma mistura de 80% de solo e 20% de erva mate, sendo que os materiais devem ser peneirados, o solo utilizado foi aquele retido entre as peneiras de números 16 e 30 mm, enquanto a erva mate utilizada foi aquela passante pela peneira de número 200 mm.

Desta forma Zimmer (2020) determinou que para se obter a turbidez desejada de 75,7 NTU, que foi a turbidez média encontrada por Becker (2018) no escoamento superficial do Campus 2 da FURB, em 100 ml é necessário 0,0412 g da mistura de solo (80%) e erva mate (20%). Sabendo disso, e levando em conta que a capacidade de armazenamento do reservatório utilizado era de 5000 L, foi utilizado 2,06 kg de material particulado para se obter a turbidez requerida.

### **Simulação de chuva**

A água sintética armazenada no reservatório de 5000 L alimentava o simulador de chuva através de uma bomba centrífuga da marca Franklin Electric, modelo BC-09, que após sua saída de recalque teve instalado um acessório tipo T que permitiu uma dupla saída da água sintética, sendo uma das saídas direcionada ao reservatório com objetivo de realizar uma circulação da água presente neste para que os sólidos constituintes da água não sedimentassem e a outra saída possuía em sua extremidade um dispersor similar a um chuveiro que possibilitou que a água, durante a simulação, atingisse a área do pavimento como um todo (Figura 2).



**Figura 2:** Simulador de chuva. **Fonte:** Zimmer (2020).

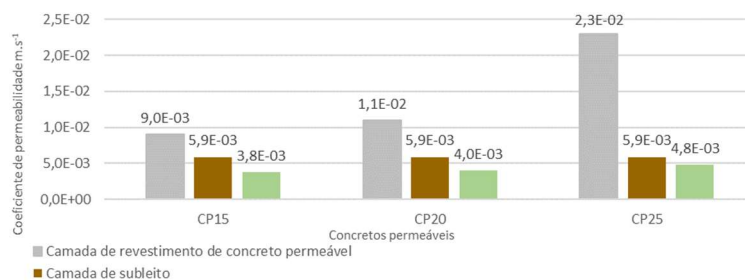
Medição do coeficiente de permeabilidade das unidades experimentais de pavimentos permeáveis de concreto permeável. Antes de iniciar a medição do coeficiente de permeabilidade das unidades experimentais foi realizado o pré adensamento utilizando água do sistema de abastecimento, pois segundo Zimmer (2020) o adensamento previsto para as unidades experimentais com sistema de infiltração total é entre 3,2 e 4,0 cm.

O coeficiente de permeabilidade das unidades experimentais de pavimento permeável de concreto permeável foi medido de forma contínua durante toda simulação desde o instante inicial até a colmatagem em intervalos de 10 minutos. A colmatagem do pavimento foi definida quando houvesse redução do coeficiente de permeabilidade inferior a 0,5% durante 6 leituras seguidas (60 minutos).

A temperatura da água e o coeficiente de permeabilidade das unidades experimentais de pavimentos permeáveis de concreto permeável foram medidos em triplicada para cada período de 10 minutos utilizando a lei de Darcy com carga variável e realizando a correção da viscosidade da água.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

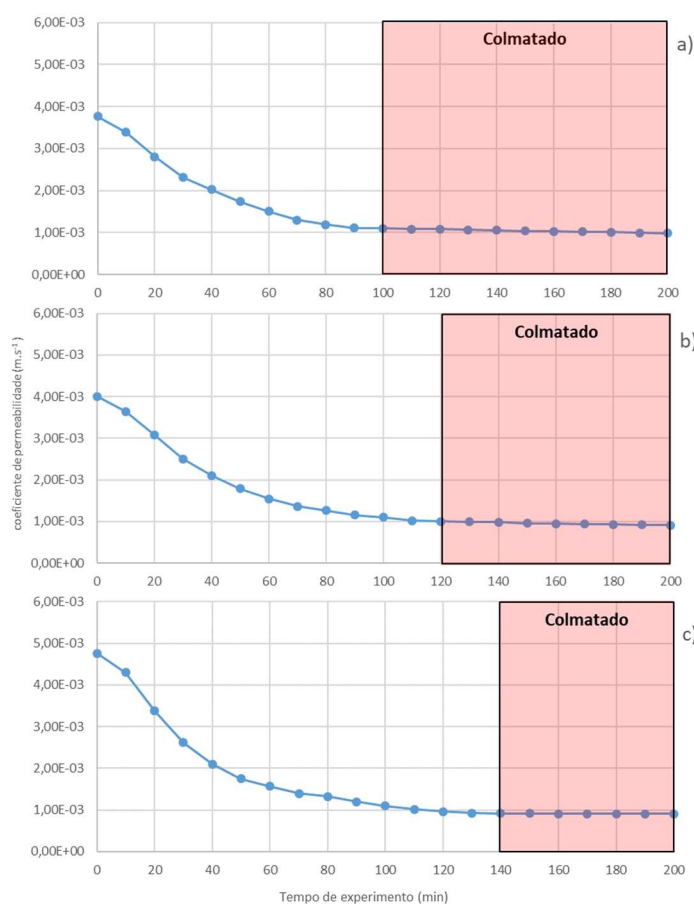
O coeficiente de permeabilidade inicial das unidades experimentais de pavimento permeável de concreto permeável com infiltração total foi de  $3,8 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ,  $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$  e  $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ , para unidades experimentais com concretos permeáveis com 15, 20 e 25% de índices de vazios (Figura 3). O valor do coeficiente de permeabilidade dos concretos permeáveis com índice de vazios de 15, 20 e 25% foram  $9,0 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ ,  $1,1 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$  e  $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$  e o valor do coeficiente de permeabilidade da camada de subleito foi de  $5,9 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$ .



**Figura 3:** Comparação entre o coeficiente de permeabilidade inicial das unidades experimentais com infiltração total e o coeficiente de permeabilidade das camadas constituintes. Onde: CP15 = Corpo de prova com índice de vazios de 15%; CP20 = Corpo de prova com índice de vazios de 20%; CP25 = Corpo de prova com índice de vazios de 25%.

As unidades experimentais de pavimento permeável de concreto permeável com sistema sem infiltração tiveram seus coeficientes de permeabilidade inicial equiparados ao coeficiente de permeabilidade dos concretos constituintes.

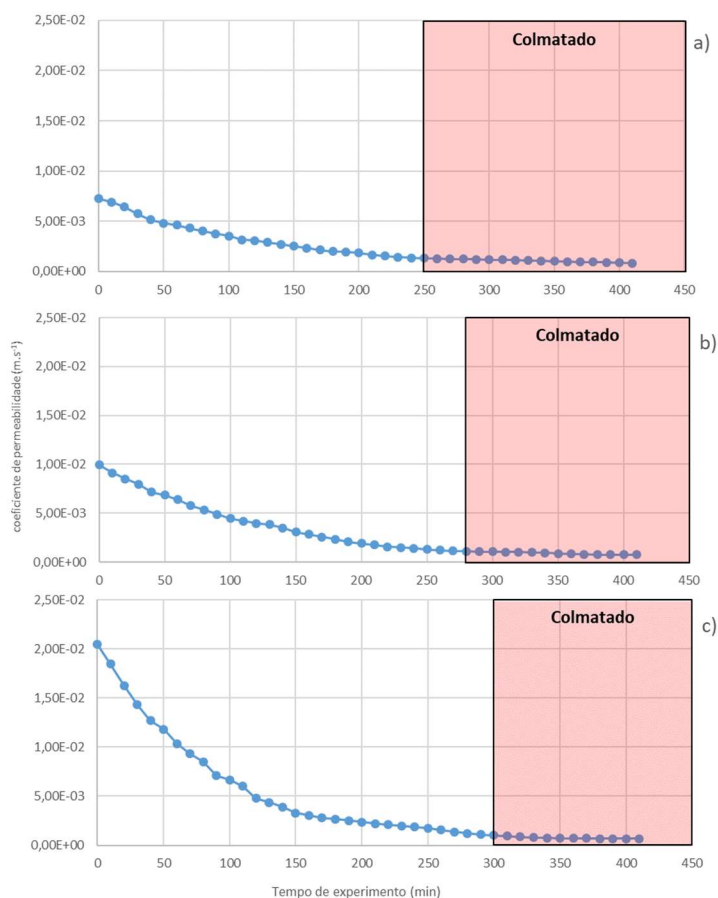
A evolução temporal do coeficiente de permeabilidade se reproduziu muito bem quando da realização dos experimentos em triplicata, uma vez que para cada experimento foi montada uma nova unidade experimental e essa constatação se verifica tanto para os pavimentos permeáveis com infiltração (Figura 4) quanto para os pavimentos permeáveis sem infiltração (Figura 5), e para os três diferentes traços do concreto permeável da camada de revestimento.



**Figura 4:** Evolução do coeficiente de permeabilidade médio dos pavimentos permeáveis de concreto permeável ao longo do tempo de experimento com infiltração total: a) para CP15, b) para CP20, c) para CP25.

A tendência das curvas das unidades experimentais com infiltração total é a mesma (Figura 4), podendo-se concluir que o processo de colmatagem obedece ao mesmo padrão. As curvas obtidas das

unidades experimentais sem infiltração têm a mesma tendência para os concretos permeáveis com 15 e 20% de índice de vazios, já a unidade experimental com concreto permeável de 25% de índice de vazios mostra outra tendência (Figura 5).



**Figura 5:** Evolução do coeficiente de permeabilidade médio dos pavimentos permeáveis de concreto permeável ao longo do tempo de experimento sem infiltração, indicando o tempo da colmatagem: a) para CP15, b) para CP20, c) para CP25.

Essa tendência observada na unidade experimental com concreto permeável com 25% de índice de vazios e sem infiltração demonstra redução do coeficiente de permeabilidade mais acelerada até os 150 minutos de experimento em relação as demais, isso pode ser explicado pelo tempo de adensamento do concreto permeável na mesa vibratória que foi de apenas 1 segundo para o disco com 25% de índice de vazios, criando assim um concreto permeável com diferentes tamanhos médios dos poros conectados em relação ao de 15% que foi vibrado por 9 segundos e ao de 20% que foi vibrado por 4 segundos.

Isso se justifica pela estrutura interna do concreto permeável ser composta por poros com diferentes tamanhos que podem variar entre 2 e 8 mm, conforme a proporção da mistura e compactação aplicada ao concreto permeável, sendo que esses diferentes tamanhos de poros influenciam na redução do coeficiente de permeabilidade (NEITHALATH et al., 2010).

O tempo de experimento até a colmatagem das unidades experimentais de pavimento permeável de concreto permeável com infiltração total foi igual a 100, 120 e 140 minutos, que equivale a um tempo real simulado de 6,5, 7,8, e 9 anos para as unidades experimentais com concreto permeável com 15, 20 e 25% de índice de vazios (Figura 4). Estando de acordo com o tempo de colmatagem encontrado por Zimmer (2020)

no intervalo de 6 a 11,5 anos para seu estudo com unidades experimentais de pavimento permeável de concreto permeável com 20% de índice de vazios e infiltração total.

Lembrando-se que a colmatagem do pavimento foi definida quando houvesse redução do coeficiente de permeabilidade inferior a 0,5% durante 6 leituras seguidas, o que corresponde a 60 minutos de experimento ou um período real simulado de 3,2 anos. Já para as unidades experimentais sem infiltração o tempo de experimento até a colmatagem foi muito superior, sendo 250, 280 e 300 minutos que equivale a um tempo real simulado de 16,2, 18,1 e 19,4 anos para as unidades experimentais com concreto permeável com 15, 20 e 25% de índice de vazios (Figura 5).

## **CONCLUSÕES**

Os pavimentos permeáveis com infiltração total colmataram em menos da metade do tempo que os pavimentos permeáveis sem infiltração, pois foi constatado que o tempo de experimento até a colmatagem dos pavimentos permeáveis de concreto permeável com infiltração total foi igual a 100, 120 e 140 minutos, que equivale a um tempo real simulado de 6,5, 7,8, e 9 anos para as unidades experimentais com concreto permeável com 15, 20 e 25% de índice de vazios. E para os pavimentos permeáveis de concreto permeável sem infiltração o tempo de experimento até a colmatagem foi muito superior, sendo 250, 280 e 300 minutos que equivale a um tempo real simulado de 16,2, 18,1 e 19,4 anos para as unidades experimentais com concreto permeável com 15, 20 e 25% de índice de vazios.

Os concretos permeáveis da camada de revestimento mostraram influência nesse tempo de colmatagem, sendo que quanto maior o índice de vazios dos concretos permeáveis maior o tempo para a colmatagem ocorrer.

Nos pavimentos sem infiltração tem-se que as partículas que são muito maiores do que os poros são retidos na superfície do concreto permeável e pode haver partículas mais finas que também ser capturadas dentro do concreto permeável. Nos pavimentos permeáveis com infiltração total além de também ocorrer esse fenômeno na camada de concreto permeável, pode ocorrer das partículas muito finas serem transportadas até o solo do subleito causando a colmatagem desse meio.

O meio que exerce maior influência sobre a colmatagem das unidades experimentais de pavimento permeável de concreto permeável com infiltração total é a camada de subleito e no caso da unidade experimental sem infiltração esse meio é o concreto permeável.

Entretanto, se está contemplando pavimentos permeáveis de concreto permeável, então mesmo se o subleito estiver colmatado no caso dos pavimentos com infiltração total, há que se considerar que existe um reservatório de acumulação que foi dimensionado perante determinadas condições hidrológicas, cuja água acumulada, para um dado evento deverá ser comportada no reservatório. A questão que se coloca diz respeito, por um lado, do tempo necessário para que o reservatório seja esvaziado e, de outro, se durante este intervalo de tempo não ocorrerá outro evento de precipitação que gere escoamento superficial que se contasse ser armazenado.

**AGRADECIMENTOS:** Agradeço ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Regional de Blumenau (FURB), por todo apoio educacional. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Brasil (Código de Financiamento 001 e Processo 88881.143991/2020-01). Agradece à CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16416**: pavimentos permeáveis de concreto – requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16697**: cimento Portland – requisito. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211**: agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 45**: agregados – determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 53**: agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ACI. American Concrete Institute. **522R**: report on pervious, elaboração. Michigan: Farmington Hills, 2010.
- BECKER, N.. **Efeito do pavimento de concreto permeável dosado por diferentes métodos na qualidade da água do escoamento superficial percolado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2018.
- CANHOLI, A. P.. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- CARLS, B.. **Coefficiente de permeabilidade, resistência mecânica e durabilidade de concreto permeável dosado por três diferentes métodos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2018.
- CHOPRA, M.; KAKUTURU, S.; BALLOCK, C.; SPENCE, J.; WANIELISTA, J.. Effect of rejuvenation methods on the infiltration rates of pervious concrete pavements. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.15, p.426-433, 2010.
- FERGUSON, B. K.. **Porous Pavements: Integrative Studies in Water Management and Land Development**. Tallahassee, 2005.
- IBRAHIM, A.; MAHMOUD, E.; YAMIN, M.; PATIBANDLAC, V. C.. Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties. **Construction and Building Materials**, v.50, p.524-529, 2014.
- KAMALI, M.; DELKASH, M.; TAJRISHY, M.. Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. **Journal of Environmental Management**, v.187, p.43-53, 2017.
- KAYHANIAN, M.; ANDERSON, D.; HARVEY, J. T.; JONES, D.; MUHUNTHAN, B.. Permeability measurement and scan imaging to assess clogging of pervious concrete pavements in parking lots. **Journal of Environmental Management**, v.95, p.114-123, 2012.
- KEIR, G.; JEGATHEESAN, V.; VIGNESWARAN, S.. Deep bed filtration: modelling theory and practice. **Water and Wastewater Treatment Technologies**, p.263-307, 2009.
- KIA, A.; WONG, H. S.; CHEESEMAN, C. R.. Clogging in permeable concrete: A review. **Journal of Environmental Management**, v.193, p.221-233, 2017.
- MATA, L. A.. **Sedimentation of pervious concrete pavement system**. Thesis (Ph.D.) - University of North Carolina, Charlotte, 2008.
- MATA, L. A.; LEMING, M. L.. Vertical distribution of sediments in pervious concrete pavement systems. **Materials Journal**, v.109, p.149-155, 2012.
- NEITHALATH, N.; SUMANASOORIYA, M. S.; DEO, O.. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. **Materials Characterization**, v.61, n.8, p.802-813, 2010.
- NGUYEN, D. H.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M.; LELEYTER, L.; BARAUD, F.. A modified method for the design of pervious concrete mix. **Construction and Building Materials**, v.73, p.271-282, 2014.
- PINHEIRO, A.. Enchentes e inundações. In: SANTOS, R. F.. **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. p.97-99.
- REZENDE, M. L. S.; EIRES, R.; CAMÕES, A.; JESUS, C.. Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuvas

para teste acelerado de degradação. **Revista de Engenharia Civil**, Minho, n.53, p.17-28, 2016.

SANDOVAL, G. F. B.; MOURA, A. C.; JUSSIANI, E. I.; ANDRELLO, A. C.; TORALLES, B. M.. Proposal of maintenance methodology for pervious concrete (PC) after the phenomenon of clogging. **Construction and Building Materials**, v.248, p.1-12, 2020.

SANTOS, R. F.; CALDEYRO, V. S.. Enchentes e inundações. In: SANTOS, R. F.. **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. p.17-21.

SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A.. Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.12, n.2, p.157-168, 2007.

THOMASZIELLO, S.. Enchentes e inundações. In: SANTOS, R. F.. **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. p.24-37.

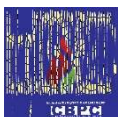
VIRGILIIS, A. L. C.. **Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

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

ZIMMER, G. V.. **Efeito do escoamento superficial sobre a colmatagem e o adensamento de pavimentos de concreto permeáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2020.

Os autores detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea ([https://opensea.io/HUB\\_CBPC](https://opensea.io/HUB_CBPC)), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).

*The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).*



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/44951876800440915849902480545070078646674086961356520679561157625182918017025/>