

Qualidade da água do escoamento superficial percolado em pavimento de concreto permeável dosado por diferentes métodos

Water quality of runoff percolated in permeable concrete pavement dosed by different methods

Nayara Becker¹ , Mariana Garcia Conegero¹ , Ivone Gohr Pinheiro¹ 

¹Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil. E-mails: nayarab@gmail.com, mariana.conegero@gmail.com, ivonegp@furb.br

Como citar: Becker, N., Conegero, M. G., & Pinheiro, I. G. (2022). Qualidade da água do escoamento superficial percolado em pavimento de concreto permeável dosado por diferentes métodos. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 19, e2. <https://doi.org/10.21168/rega.v19e2>

RESUMO: O escoamento superficial pode ocasionar enchentes urbanas e transportar alta carga de poluentes. O pavimento de concreto permeável pode reter poluentes presentes no escoamento superficial e reduzir seu volume. Desse modo, o efeito da percolação do escoamento superficial em pavimentos de concreto permeável executado com três diferentes métodos de dosagem, *American Concrete Institute* - ACI (2010), Zheng et al. (2012) e Nguyen et al. (2014) foi avaliado. O objetivo foi analisar a retenção de poluentes em pavimentos permeáveis e a interferência de diferentes vazões. Foram construídos três pavimentos em escala laboratorial, um para cada método de dosagem. Quanto à avaliação do efeito da percolação foram analisados os seguintes parâmetros no escoamento superficial natural e após a percolação: cor aparente, turbidez, pH, cobre, zinco e coliformes totais. ACI e Nguyen et al. obtiveram uma redução média superior a 65% para a turbidez e superior a 50% para a cor aparente. A remoção dos coliformes totais foi acima de 95% para os três métodos de dosagem. A redução na concentração de zinco foi semelhante para os três métodos de dosagem, para o cobre foi superior com o método de Nguyen et al., em média 83,8%.

Palavras-chave: Escoamento Superficial; Pavimentos Permeáveis; Concreto Permeável; Percolação.

ABSTRACT: Runoff can cause urban flooding as well as carry a high load of pollutants. The permeable concrete pavement can retain pollutants present in the runoff and reduce its volume. Thus, the percolation effect of runoff on permeable concrete pavements executed with three different dosing methods, American Concrete Institute - ACI (2010), Zheng et al. (2012) and Nguyen et al. (2014) was evaluated. The aim was to analyze the pollutant retention in permeable pavements for different flow rates. Three pavements were built on a laboratory scale, one for each dosing method. Regarding the evaluation of the percolation effect, the following parameters were analyzed in the runoff and after the percolation: apparent color, turbidity, pH, copper, zinc, and total coliforms. ACI and Nguyen et al. provided an average reduction of more than 65% for turbidity and more than 50% for apparent color. The total coliforms removal was over 95% for the three dosing methods. The zinc concentration reduction was similar for the three dosing methods, and copper concentration was higher in the Nguyen et al. method, on average 83.8%.

Keywords: Runoff; Permeable Pavements; Pervious Concrete; Percolation.

INTRODUÇÃO

A rápida expansão da urbanização nas últimas décadas provocou um aumento significativo de superfícies impermeáveis (Liu et al., 2020), e assim modificou os processos hidrológicos urbanos, que são muito sensíveis às variações da impermeabilização do solo (Endreny & Thomas, 2009). A diminuição de áreas permeáveis implicou na redução da drenagem natural do solo (armazenamento, percolação e recarga de água subterrânea) e, como consequência ocorreu o aumento dos volumes de escoamento superficial (Huang et al., 2016; Liu & Borst, 2018). Este fenômeno associado ao aumento

Recebido: Junho 16, 2021. Revisado: Outubro 26, 2021. Aceito: Dezembro 06, 2021.



em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

das precipitações pode aumentar as inundações em áreas urbanas (Turco et al., 2017). O uso de pavimentos permeáveis é uma medida de controle na fonte (Newman et al., 2004; Silveira & Goldenfum, 2007), capaz de mitigar os problemas de inundações urbanas, devido ao fato de a água do escoamento superficial percolar pelo pavimento, reduzindo seu volume (Huang et al., 2016).

Além das inundações urbanas, o escoamento superficial promove o transporte de poluentes depositados sobre os pavimentos, ocasionando a contaminação da água superficial, subsuperficial e subterrânea (Göbel et al., 2007; Revitt et al., 2014). Entre os poluentes presentes no escoamento superficial estão os metais pesados, sendo que sua ocorrência está diretamente relacionada com o tráfego rodoviário, pois há liberação de metais pesados devido ao desgaste de pneus, emissão de gases da combustão, óleos lubrificantes, construção e manutenção de rodovias (Council et al., 2004; Jiang et al., 2015; Reddy et al., 2014). A matéria orgânica e os nutrientes, nitrogênio e fósforo são considerados poluentes do escoamento superficial e, são provenientes da degradação de folhas, resíduos de animais, aplicação de fertilizantes e pesticidas. Poluentes atmosféricos se acumulam em edifícios e cinturões verdes localizados próximos a pavimentos, e em eventos de chuva são transportados pelo escoamento superficial (Jiang et al., 2015).

Os pavimentos permeáveis reproduzem os processos hidrológicos ao percolar, filtrar, armazenar, evaporar e reter o escoamento superficial próximo à sua fonte de geração (Turco et al., 2017). O uso de pavimentos permeáveis possibilita a mitigação dos problemas ocasionados pelo escoamento superficial, porque diminui a ocorrência de inundações, devido ao fato de a água do escoamento superficial percolar pelo pavimento, reduzindo seu volume. A percolação da água do escoamento superficial em pavimentos permeáveis melhora a qualidade dessa água e promove a recarga da água subterrânea (Huang et al., 2016; Kayhanian et al., 2019; Lian & Zhuge, 2010; Scholz & Grabowiecki, 2007). A qualidade da água do escoamento superficial pode ser melhorada, pelos pavimentos permeáveis, através de mecanismos de remoção de poluentes que incluem adsorção, filtração, sedimentação e decomposição biológica (Fassman & Blackburn, 2010; Liu & Borst, 2018; Mbanaso et al., 2019; Pratt et al., 1999).

Dentre os diferentes tipos de revestimento para pavimentos permeáveis, destaca-se o concreto permeável e sua promissora capacidade de reter poluentes do escoamento superficial, resultante de características como sua estrutura interna porosa que possui espaços curvilíneos ou sinuosos que retiram partículas em suspensão da água do escoamento superficial (Chandrappa & Biligiri, 2016; Sansalone et al., 2012). Outro fator importante é a presença de atividade microbiana nos poros do concreto, que promove a degradação biológica. A natureza alcalina do concreto permeável também auxilia na precipitação de contaminantes (Chandrappa & Biligiri, 2016).

As vantagens de remoção de poluentes pelo concreto permeável citadas são atribuídas, em parte, à sua estrutura porosa. Para se alcançar uma estrutura de poros eficiente, na execução do concreto permeável utilizam-se agregados graúdos, pouco ou nenhum agregado fino, cimento Portland e água (Tennis et al., 2004). A porosidade é compreendida entre 15-35% (Yahia & Kabagire, 2014), buscando-se manter o equilíbrio entre o coeficiente de permeabilidade e as propriedades mecânicas do material. O tamanho médio dos poros pode variar de 2 a 8 mm, conforme a proporção da mistura (Neithalath et al., 2010), que é definida de acordo com as características dos materiais utilizados a partir de um método de dosagem (Neville & Brooks, 2013). No entanto, a quantidade de métodos de dosagem encontrada na literatura para concreto permeável é limitada (Carls et al., 2018).

Dentre os métodos de dosagem encontrados, que foram utilizados no presente estudo, pode-se citar o método do *American Concrete Institute* (American Concrete Institute, 2010) desenvolvido nos Estados Unidos, o método de Nguyen (Nguyen et al., 2014) elaborado por pesquisadores na França, e o de Zheng (Zheng et al., 2012) concebido na China. O método do ACI foi selecionado por ser bem estabelecido, tendo seu primeiro relatório publicado em 2006, enquanto os métodos de Nguyen et al. e de Zheng, apesar de serem mais recentes, possuem embasamento na literatura científica, tanto ainda como diferencial, o método de Nguyen et al. o fato de ser analítico e não empírico como os outros dois selecionados (Carls, 2018). O método de Nguyen et al. tem seu fundamento na quantificação de pasta cimentícia necessária, de modo que não seja escassa, prejudicando a resistência mecânica ou excedente resultando em uma baixa permeabilidade inicial do concreto permeável (Nguyen et al., 2014). O método do ACI teve sua concepção feita a partir de resultados experimentais que tinham sua atenção voltada para a correlação entre o volume de vazios e a resistência à compressão e o volume de pasta cimentícia (American Concrete Institute, 2010). Por fim, o método de Zheng é alcançado com base nas propriedades físicas dos agregados a serem utilizados no concreto permeável (Zheng et al., 2012).

No Brasil, Moura (2020) propôs um método de dosagem para o concreto permeável com a incorporação de resíduo de vidro cominuído. Contudo, o estado da arte brasileiro sobre pavimentos permeáveis é concentrado em pesquisas com enfoque em avaliar o desempenho hidráulico dos pavimentos permeáveis (Antunes, 2017; Batezini, 2019; Coutinho, 2011; Curvo, 2017; Marinho, 2018; Ono, 2018; Ribas, 2017; Santos, 2016). Estudos voltados para a concepção da camada de revestimento foram encontrados, desde a elaboração do traço do concreto permeável com os materiais disponíveis no mercado brasileiro (Carls, 2018; Costa, 2019; Lamb, 2014; Mariano, 2014; Silva, 2019), assim como a avaliação do método de compactação (Risson, 2017). A incorporação de resíduos como forma de substituir parcial ou totalmente os agregados graúdos também é estudada (Lima, 2018; Mikami, 2017; Paula Júnior, 2019; Ribeiro, 2014).

Entretanto, a avaliação da qualidade da água do escoamento superficial após sua percolação pelo pavimento permeável tem um menor enfoque no Brasil. Na literatura encontrada, apenas o trabalho de Castro (2011) investigou se a percolação em pavimento de asfalto permeável poderia contribuir para o aumento da contaminação do escoamento superficial percolado, concluindo que os pavimentos permeáveis auxiliam na remoção de poluentes.

Em nível mundial encontram-se mais pesquisas com o objetivo de verificar a qualidade de água do escoamento superficial percolada em pavimentos permeáveis com diferentes revestimentos, como concreto permeável (com peças pré-moldadas ou moldado *in loco*) (Braswell et al., 2018; Hernández-Crespo et al., 2019; Nnadi et al., 2015), asfalto permeável (Jiang et al., 2015), intertravado (Kamali et al., 2017; Myers et al., 2011), e com o comparativo destes três revestimentos (Brown & Borst, 2015; Liu & Borst, 2018; Razzaghmanesh & Borst, 2019). Portanto, pode-se constatar que no Brasil ainda há um grande campo de pesquisa no que tange a qualidade de água percolada por pavimentos permeáveis.

O cenário dos centros urbanos, apresenta de um lado a preocupação dos impactos negativos que podem acompanhar o escoamento superficial, como o aumento de alagamentos e da poluição transportada pelo escoamento superficial. De outro, vê-se os pavimentos permeáveis como forma de mitigar estes impactos, mas ainda com muitas lacunas de informações, principalmente em relação ao que se refere a qualidade da água do escoamento superficial percolada pelo pavimento permeável. Diante disso, este estudo teve como objetivo analisar o efeito da percolação da água do escoamento superficial em pavimentos permeáveis, de modo a avaliar a retenção de poluentes no escoamento efluente de pavimentos permeáveis com revestimentos em concreto permeável executados com três diferentes métodos de dosagem. Buscou-se testar as hipóteses de que a percolação da água do escoamento superficial reduz a concentração de poluentes e que um dos três métodos de dosagem fornece uma melhor resposta.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Campus II da Fundação Universidade Regional de Blumenau (FURB), durante os meses de outubro e novembro de 2017, na cidade de Blumenau, Santa Catarina, Brasil e consistiram na percolação de água do escoamento superficial em pavimentos permeáveis. Os pavimentos permeáveis foram dimensionados e sua camada de revestimento foi executada com concreto permeável executado com três diferentes métodos de dosagem.

A água do escoamento superficial utilizada foi natural, captada no estacionamento da FURB e foram realizadas análises físico-químicas e microbiológicas no escoamento superficial antes e após sua percolação, o que possibilitou a análise do comportamento destes parâmetros, e, consequentemente a avaliação e comparação, entre cada pavimento de concreto permeável.

Construção do pavimento permeável

O pavimento permeável foi construído com base na estrutura utilizada por Jiang et al. (2015), dentro de um suporte de tubo de PVC de 200 mm de diâmetro (Zipf et al., 2016; Zipf et al., 2013). Na parte superior foram colocadas as peças de concreto permeável, seguidas pela camada reservatório de 40 cm de brita zero. Abaixo da camada de reservatório de brita, foi aplicada uma camada de 30 cm de areia fina (Beecham et al., 2012; Jiang et al., 2015). Sob a camada de areia fina, foi colocado 10 cm de brita zero como camada suporte para evitar a perda de areia, assim como também foi colocada uma manta geotêxtil entre e ao redor das camadas de base (Figura 1).

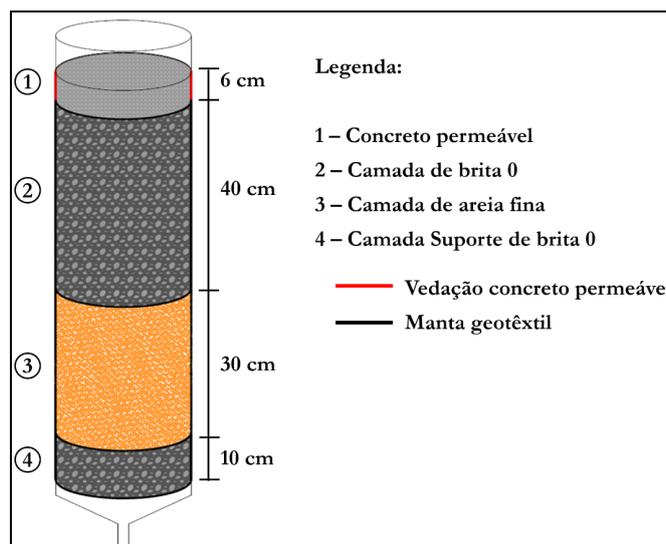


Figura 1 - Configuração do pavimento permeável.

Fonte: Autores (2021).

A caracterização da areia fina e da brita zero foi feita a fim de determinar o diâmetro superficial médio (D_s), coeficiente de uniformidade (C_u), o módulo de finura (MF), o diâmetro efetivo D_{10} e o diâmetro D_{60} (Tabela 1). Com o auxílio de um permeâmetro, foi determinada a condutividade hidráulica e permeabilidade da camada de areia fina e da camada de brita, por meio da lei de Darcy.

Tabela 1 - Caracterização granulométrica das camadas de base do pavimento permeável.

Parâmetro	Areia fina	Brita 0
Diâmetro superficial médio (mm)	0,24	8,56
Módulo de finura	1,48	2,48
Diâmetro efetivo D_{10} (mm)	0,02	5,59
D_{60} (mm)	0,30	10,23
Coefficiente de uniformidade	13,85	1,83

Fonte: Autores (2021).

A condutividade hidráulica da areia fina foi de $2,0 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, enquanto sua permeabilidade foi de $2,0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$. A condutividade hidráulica da areia fina assumiu valor próximo ao encontrado na literatura de $3,0 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$, (Murnane et al., 2016). Para a brita zero, a condutividade hidráulica foi de $4,1 \times 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$, alcançando uma permeabilidade de $4,2 \times 10^{-9} \text{ m}^2$.

A espessura da camada de reservatório de brita zero foi calculada pelo método da curva envelope descrito por Silveira & Goldenfum (2007). Para o cálculo dos parâmetros a , b e c da equação de Talbot foram utilizadas as constantes k , m , b e n fornecidas por Back & Bonetti (2014), para a estação pluviométrica de Blumenau, localizada na região central no município, código 02649007, coordenadas $26^{\circ}55'05,0''\text{S}$ e $49^{\circ}03'55,0''\text{W}$ (Brasil, 2009). O período de retorno considerado foi de 10 anos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015). Para o produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo, considerou-se a área contribuinte com as mesmas dimensões do pavimento permeável. Para o cálculo da vazão de saída do pavimento foi utilizado o valor da condutividade hidráulica saturada do solo tipo cambissolo fornecido por Betim (2013) e o coeficiente redutor devido à colmatagem igual a 0,1, de acordo com Silveira & Goldenfum (2007). Ao final o volume de dimensionamento calculado foi de 158,8 mm, com uma porosidade de 40% para o material de enchimento do dispositivo (Araújo et al., 2000), obtém-se a profundidade de 40 cm para a camada reservatório.

A camada de revestimento de concreto permeável, na forma de uma peça circular, foi executada com três diferentes métodos de dosagem do concreto (American Concrete Institute, 2010; Nguyen et al., 2014; Zheng et al., 2012). As peças foram confeccionadas com 6 cm de espessura, mínimo permitido para camada de revestimento de pavimentos permeáveis de concreto (Associação

Brasileira de Normas Técnicas, 2015) e, executadas de acordo com a granulometria adaptada para cada método de dosagem, sendo que a definição do traço foi realizada por Carls (2018) (Tabela 2).

Tabela 2 - Consumo de material no concreto permeável com granulometria adaptada ao método.

Método	Cimento (kg m ⁻³)	Água (kg m ⁻³)	Brita (kg m ⁻³)	Areia (kg m ⁻³)	Relação água/cimento
ACI	344	109	1527	106	0,32
Ngu	338	115	1427	99	0,34
Zhe	249	100	1544	107	0,40

ACI – American Concrete Institute (2010); Ngu – Nguyen et al. (2014); Zhe – Zheng et al. (2012).

Fonte: Adaptado de Carls (2018).

Antes de acomodar a peça de concreto permeável dentro do tubo de PVC, foi feita a vedação na lateral das peças com silicone, garantindo que a água do escoamento superficial percolasse por toda a camada de revestimento e não houvesse fuga entre a parede do tubo de PVC e a lateral da peça.

Operação do sistema

A água do escoamento superficial utilizada foi natural e coletada no estacionamento do campus da universidade, desviando-se o fluxo normal da água do escoamento superficial direcionada a uma boca de lobo diretamente para um reservatório, armazenando-se, aproximadamente, 1000 L. A água do escoamento superficial foi coletada em um único evento, sendo que antecedente a esse evento de chuva decorreram 15 dias sem chuva (Agência Nacional de Águas, 2021). A água do escoamento superficial foi usada parcialmente até a finalização de todos os experimentos, que ocorreu após 3 meses da coleta.

As vazões aplicadas nos pavimentos permeáveis foram determinadas em função da altura de chuva de acordo com a equação de Talbot, com período de retorno de 10 anos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015) e duração do evento de 2 horas (Back, 2002), essa duração é o tempo necessário para obter a quantidade suficiente de água percolada pelo pavimento permeável para se realizar as análises. Os parâmetros utilizados no dimensionamento do reservatório foram de acordo com Back & Bonetti (2014), obtendo-se uma intensidade de chuva de 63 mm h⁻¹ (Silveira & Goldenfum, 2007), resultando em função da área do pavimento permeável (0,0314 m²) em uma vazão de 33 mL min⁻¹. Foram utilizadas mais duas vazões, uma que corresponde a um valor 50% maior (50 mL min⁻¹ para uma intensidade de chuva de 95,5 mm h⁻¹ e período de retorno de 86,4 anos) e a outra 50% menor que a vazão inicialmente calculada (17 mL min⁻¹ para uma intensidade de chuva de 32,5 mm h⁻¹, com período de retorno de 4 meses).

Cada ensaio durou um período de 2 horas, optando-se entre chuvas com duração de até 120 minutos ou entre 120 a 1140 minutos (Back, 2002). O intuito do estudo não foi avaliar longos períodos de chuva, portanto, elegeu-se o período com menor duração.

Foram realizados três experimentos por dia, um para cada diferente método de dosagem da camada de concreto. Para cada uma das três vazões o experimento foi realizado em quadruplicata. No caso da primeira vazão aplicada (50 mL min⁻¹), o experimento foi realizado em octuplicatas, devido ao adensamento das camadas de base, totalizando 48 experimentos (Tabela 3).

Tabela 3 - Quantificação de ensaios para cada método de dosagem do concreto permeável da camada de revestimento do pavimento permeável e vazão aplicada.

Método	Vazão (mL min ⁻¹)		
	17	33	50
ACI	4	4	8
Ngu	4	4	8
Zhe	4	4	8

ACI – American Concrete Institute (2010); Ngu – Nguyen et al. (2014); Zhe – Zheng et al. (2012).

Fonte: Autores (2021).

O procedimento experimental foi iniciado com a homogeneização da água do escoamento superficial contido no reservatório de alimentação. Uma agitação de 20 segundos foi realizada a cada cinco minutos durante as duas horas de duração do ensaio. Foram coletadas, em triplicatas, as amostras da água do escoamento superficial bruto e feito o ajuste da vazão de entrada, dando início a contagem das duas horas de experimento. Amostras da água percolada pelo pavimento permeável foram coletadas a cada 15 minutos, em triplicata.

Após a execução dos ensaios, cada pavimento foi limpo com água potável em fluxo descendente durante 15 minutos, mantendo-se sempre uma lâmina de 20 cm de água tratada sobre o pavimento. A eficiência da limpeza foi analisada pela turbidez da água que deveria voltar a atingir os valores padrão de água potável, de acordo com a portaria n. 05 (Brasil, 2017).

Parâmetros analisados e tratamento dos dados

A verificação da influência da percolação da água do escoamento superficial pelos pavimentos permeáveis foi verificada pelos parâmetros físico-químicos (pH, cor aparente e turbidez), realizados em todos os ensaios. Enquanto as análises microbiológicas (coliformes totais e *Escherichia coli*) e dos metais pesados (Cu e Zn), foram realizadas somente nos experimentos realizados com a vazão de 33 mL min⁻¹ (Tabela 4).

Os parâmetros de pH, turbidez, cobre e zinco foram selecionados a partir da literatura existente. Foi escolhido o parâmetro de cor aparente e não a cor real pela facilidade de realização da análise em detrimento ao fato de se serem muitas amostras a serem analisadas. Em relação aos coliformes totais e *Escherichia coli*, esta é pouco relatada na literatura, por este motivo foi realizada a análise microbiológica, como forma de preencher a lacuna de informação sobre este parâmetro na qualidade da água do escoamento superficial percolado em pavimentos permeáveis. Ressalta-se que, para todos os parâmetros, antes de cada simulação realizada com os pavimentos permeáveis era feita a homogeneização do escoamento superficial e coletada amostras em triplicata que posteriormente foram comparadas com os resultados obtidos do escoamento superficial percolado, estas também coletadas em triplicata.

Tabela 4 - Parâmetros analisados.

Parâmetro	Método de análise	Equipamentos utilizados	Vazão aplicada (mL min ⁻¹)
pH	Potenciometria	Peagâmetro	17, 33 e 50
Turbidez	Nefelométrico	Turbidímetro	17, 33 e 50
Cor aparente	Espectrofotometria	Espectrofotômetro	17, 33 e 50
Cu	Espectrofotometria	Espectrofotômetro de absorção atômica em forno de grafite	33
Zn	Espectrofotometria	Espectrofotômetro de absorção atômica em forno de grafite	33
Coliformes totais	Colilert	Seladora e estufa	33
<i>Escherichia coli</i>	Colilert	Seladora e estufa	33

Fonte: Autores (2021).

A avaliação dos métodos de dosagem de concreto permeável e das vazões aplicadas, nos parâmetros analisados da água do escoamento superficial, ocorreu a partir da análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey dos resultados obtidos, realizada no software Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 2016). Desta forma, analisou-se as interferências dos métodos de dosagem, assim como das diferentes vazões, sobre a qualidade da água. Para minimizar erros provocados por alterações na água do escoamento superficial, a análise estatística foi feita com os dados de variação do parâmetro analisado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes de iniciar cada experimento, após a homogeneização do escoamento superficial bruto, foram analisados os parâmetros de cor aparente, pH e turbidez (Tabela 5).

Tabela 5 - Dados do escoamento superficial natural utilizado nos experimentos.

Parâmetro	pH	Turbidez (NTU)	Cor aparente (mg Pt Co L ⁻¹)
Média	7,9	75,7	381,2
Desvio padrão	0,2	12,3	65,7
Faixa de variação	7,2 - 8,6	50,7 - 108,7	224,7-597,0

Fonte: Autores (2021).

INFLUÊNCIA DA VAZÃO E DOS MÉTODOS DE DOSAGEM DO CONCRETO PERMEÁVEL NOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PERCOLADO

Observou-se, a partir da ANOVA com intervalo de confiança de 95%, que a variação do método de dosagem do concreto permeável ou da vazão do escoamento percolado, bem como sua interação não têm interferência estatisticamente significativa, sobre os valores médios da variação de cor aparente e turbidez ($p < 0,05$). Ou seja, a variabilidade da turbidez e cor aparente, comparando os diferentes grupos (métodos de dosagem e vazões aplicadas), foi inferior a variabilidade verificada dentro de cada grupo.

Em relação ao pH, tanto a interação, quanto os métodos de dosagem do concreto e as vazões separadamente, são significativos, de acordo com a ANOVA ($p < 0,05$). Com o teste de Tukey foi feita a estratificação, de modo a verificar a ocorrência de diferença significativa de pH entre os grupos (métodos de dosagem e vazões) da água do escoamento superficial percolada. Os grupos estão identificados na Figura 2 com letras acima das barras, aqueles que tiverem a mesma letra não possuem diferença estatisticamente significativa entre si. Percebe-se que o método Ngu (Nguyen et al., 2014) apresentou as maiores variações de pH (Figura 2a), para todas as vazões aplicadas, sendo, portanto, o método que mais altera o valor do pH do escoamento superficial percolado (Figura 2b), uma vez que o pH médio do escoamento superficial era de 7,9 (Tabela 5). No método do ACI (American Concrete Institute, 2010) a variação do pH não é influenciada pela variação da vazão e no método de Zhe (Zheng et al., 2012) esta influência é verificada apenas para o caso da menor vazão.

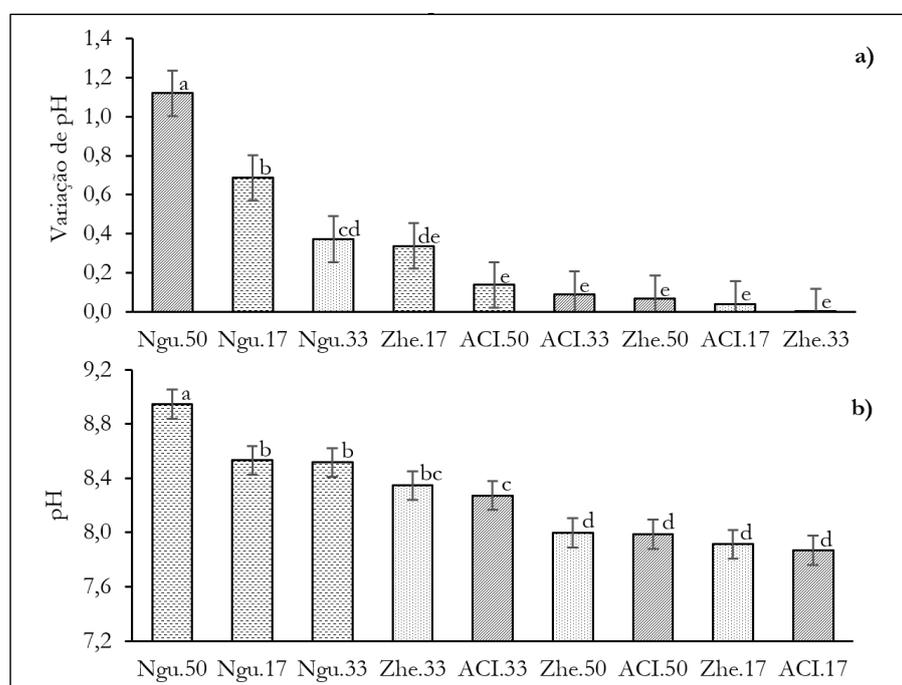


Figura 2 - Teste de Tukey: a) para variação de pH; b) para valor de pH no efluente do pavimento de concreto permeável.

Métodos: ACI - American Concrete Institute (2010); Zhe - Zheng et al. (2012); Ngu - Nguyen et al. (2014). Vazões: 17 mL min⁻¹; 33 mL min⁻¹; 50 mL min⁻¹. Fonte: Autores (2021).

Apesar de não ter havido diferença estatisticamente significativa, de acordo com a ANOVA com intervalo de confiança de 95%, no valor médio de saída de turbidez e de cor aparente em função das

diferentes vazões e métodos de dosagem do concreto permeável ($p < 0,05$), cabe salientar que foi utilizado escoamento superficial natural cujos valores de turbidez e cor aparente variaram bastante (Tabela 6). Em consequência buscou-se avaliar a variação para cada situação, buscando melhor compreensão do processo.

Tabela 6 - Valores médios absolutos de turbidez, cor aparente e pH do escoamento percolado para cada método de dosagem de concreto permeável e vazão aplicada.

Métodos de dosagem	Vazão (mL min ⁻¹)					
	17		33		50	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
Turbidez (NTU)						
ACI	25,0	13,0	18,3	9,4	21,7	6,5
Ngu	22,4	10,7	24,7	15,4	18,6	7,2
Zhe	28,7	14,5	17,2	6,0	30,8	10,0
Cor aparente (mg Pt Co L⁻¹)						
ACI	191,2	93,7	125,3	68,0	168,9	48,5
Ngu	183,0	72,7	179,0	102,8	148,7	47,9
Zhe	218,6	91,2	110,0	57,5	231,1	72,7
pH						
ACI	7,9	0,11	8,3	0,13	8,0	0,09
Ngu	8,5	0,14	8,5	0,16	8,9	0,24
Zhe	7,9	0,09	8,3	0,12	8,0	0,07

Métodos: ACI - American Concrete Institute (2010); Zhe - Zheng et al. (2012); Ngu - Nguyen et al. (2014). DP: desvio padrão. Fonte: Autores (2021).

Influência dos métodos de dosagem do concreto permeável na variação de turbidez

Cada experimento foi realizado em um dia, gerando sempre uma série de quatro dias seguidos de experimentos e depois uma pausa de três dias para a próxima sequência de quatro dias seguidos de experimentos. Nos experimentos 1, 5, 9 e 13, que correspondem a execução do experimento após essa pausa, se observa que para os três métodos de dosagem de concreto permeável, a variação de turbidez é superior aos dias subsequentes, o que sugere a interferência da umidade na redução da turbidez (Figura 3).

Os sólidos presentes no escoamento superficial podem ser removidos por adsorção (Luck et al., 2008), entretanto a capacidade de remoção por adsorção é reduzida com o aumento da umidade (Gonzalez & Taylor, 2016; Guo et al., 2015; Huang et al., 2018), o que explica a maior redução de turbidez quando o experimento estava há alguns dias sem ser executado e, conseqüentemente os pavimentos permeáveis com menor teor de umidade. Portanto, a ocorrência de chuvas com intervalos entre os eventos possibilitará uma maior redução na turbidez de um escoamento superficial para um mesmo valor de turbidez inicial.

A redução da turbidez para os três métodos de dosagem do concreto permeável, foi de 65,7% em média, atingindo para as melhores respostas um valor acima de 80%. O escoamento superficial, após a percolação nos pavimentos permeáveis apresentou, em todos os experimentos, um valor que atende ao padrão de classificação de águas doces, classe I, que possui como limite para turbidez 40 NTU, sendo o mais restritivo da resolução n. 357 (Brasil, 2005).

De acordo com Jiang et al. (2015), a redução da turbidez após a percolação do escoamento superficial em pavimentos permeáveis esteve na faixa de 74,4 a 87,2%. Os métodos de dosagem de concreto permeável que mais se aproximaram destes valores, considerando-se a média de todos os experimentos, foram ACI e Ngu, correspondendo a 68,0 e 69,5%, respectivamente. Zhe obteve uma remoção média de 59,5%.

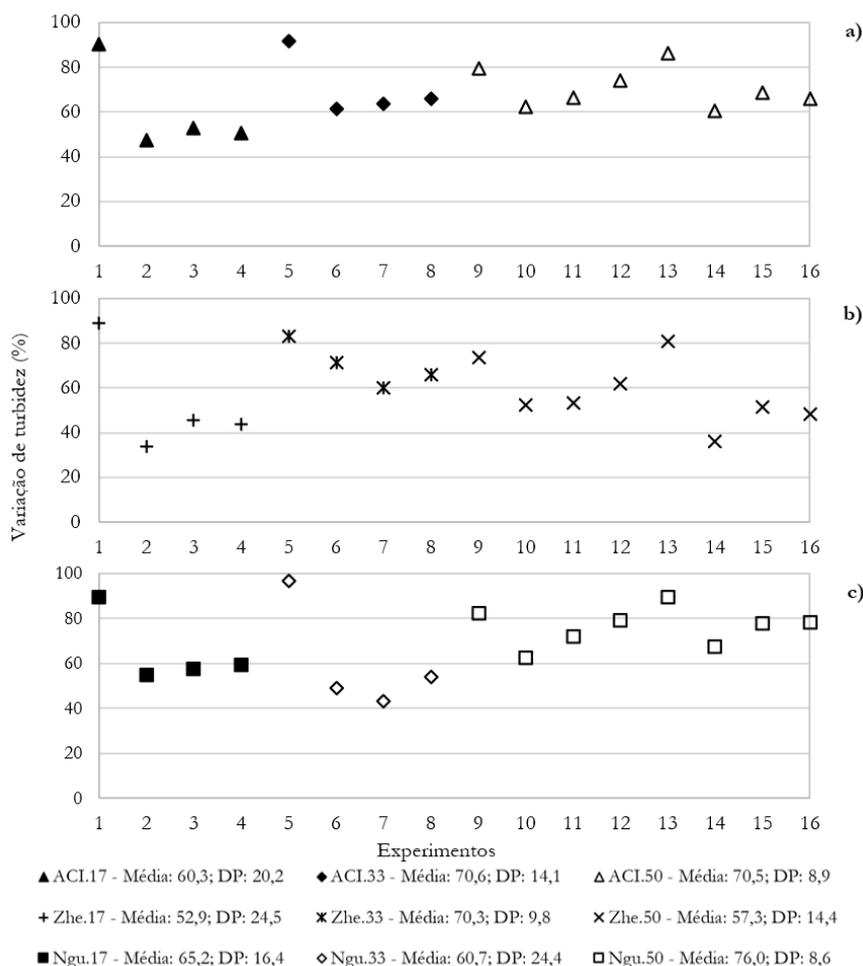


Figura 3 - Variação de turbidez pelo pavimento de concreto permeável para as três vazões e para os métodos de dosagem: a) ACI, b) Zhe, c) Ngu.

Métodos: ACI - American Concrete Institute (2010); Zhe - Zheng et al. (2012); Ngu - Nguyen et al. (2014). Vazões: 17 mL min⁻¹; 33 mL min⁻¹; 50 mL min⁻¹. Fonte: Autores (2021).

Influência dos métodos de dosagem do concreto permeável na variação da cor aparente

Como se trata de cor aparente, há a presença dos sólidos em suspensão. Devido a esta influência, observa-se que os valores obtidos da variação da cor aparente, nos experimentos 1, 5, 9 e 13, devido ao menor teor de umidade, foram bem superiores aos experimentos que ocorreram nos dias subsequentes, da mesma forma que ocorreu com a turbidez (Figura 4).

A redução da cor aparente foi de 7,1 a 19,9% menor que a remoção da turbidez, o que sugere a presença de material dissolvido no escoamento superficial. De acordo com Di Bernardo (2003), valores de cor aparente superiores a 100 mg Pt Co L⁻¹ são considerados altos, o que dificulta sua remoção. Em todos os experimentos os valores de cor aparente do escoamento superficial bruto foram superiores a 220 mg Pt Co L⁻¹, com uma média de 381,2 mg Pt Co L⁻¹, ou seja, quase quatro vezes acima do valor considerado alto para a concentração de cor aparente.

Os métodos de dosagem que obtiveram, na média geral, as maiores reduções de cor aparente, foram o Ngu (54,0%) e ACI (51,6%), enquanto o método Zhe atingiu uma eficiência média geral de 43,1%. Os métodos ACI e Zhe apresentaram comportamento semelhante, pois a maior eficiência de remoção de ambos ocorreu com a vazão intermediária (33 mL min⁻¹), seguida pela maior vazão (50 mL min⁻¹), tendo então a menor redução com a menor vazão (17 mL min⁻¹), comportamento não observado com o método Ngu.

Apesar de ter uma redução média da cor aparente de 63,2% com a vazão de 33 mL min⁻¹, o método Zhe tem uma baixa redução com as duas outras vazões, 33 e 38% (17 e 50 mL min⁻¹, respectivamente).

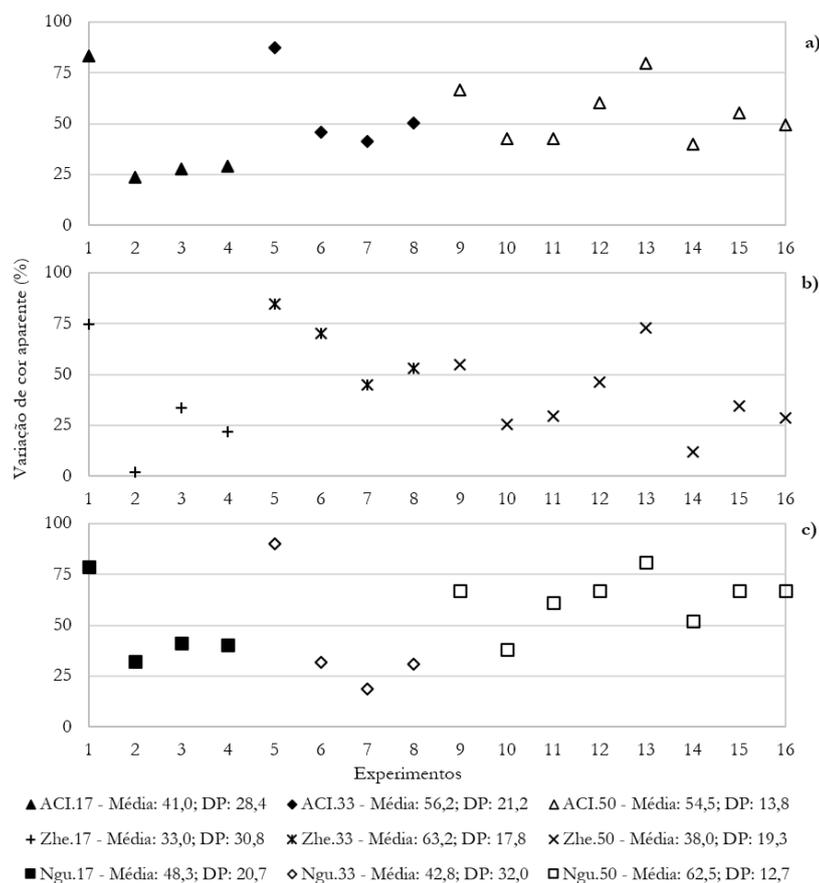


Figura 4 - Variação de cor aparente pelo pavimento de concreto permeável para as três vazões com os métodos de dosagem: a) ACI, b) Zhe, c) Ngu.

Métodos: ACI - American Concrete Institute (2010); Zhe - Zheng et al. (2012); Ngu - Nguyen et al. (2014). Vazões: 17 mL min⁻¹; 33 mL min⁻¹; 50 mL min⁻¹. Fonte: Autores (2021).

Influência dos métodos de dosagem do concreto permeável na variação do pH

O pH do escoamento superficial após a percolação, esteve na faixa de 7,8 a 9,2, considerando todos os métodos e vazões. Os maiores valores de pH são observados em todos os experimentos com o método Ngu (Figura 2b), assim como este é o método que mais apresenta variação do pH (Figura 5c). Pode-se constatar ainda, que para o método de Ngu, a maior vazão implica em uma maior variação do pH e tende a se manter constante em todos os experimentos realizados com a vazão intermediária, de 33 mL min⁻¹. O método de Zhe apresenta maior variação de pH somente para a vazão de 17 mL min⁻¹ (Figura 5b).

A maior elevação do pH com o método Ngu pode estar relacionada com a quantidade de pasta cimentícia utilizada pelo método, pois o concreto sendo alcalino tende a aumentar o pH do escoamento superficial (Chandrappa & Biligiri, 2016). Entretanto, a quantidade de pasta cimentícia utilizada pelo método Ngu é igual à quantidade do método ACI, correspondente a 453 kg m⁻³ (Carls, 2018). Portanto, só a quantidade de pasta cimentícia não interfere diretamente no aumento do pH durante a percolação do escoamento superficial.

O método Ngu é o que apresenta a maior porosidade, 14,6% e o que utiliza agregados com menor tamanho em sua execução, quando comparado com ACI e Zhe (Carls, 2018). O fato de usar agregados menores implica que seus poros também serão menores e em maior quantidade, o que contribui para o aumento da área superficial dos poros por unidade de volume (Sumanasooriya & Neithalath, 2011). Dessa forma, o aumento do pH do escoamento superficial com o método Ngu pode ser decorrente do tamanho do agregado que gera poros menores, uma maior área superficial, e conseqüentemente tem-se um maior contato do escoamento superficial com a camada de concreto permeável alcalina, acarretando o aumento significativo do pH.

De acordo com a literatura, o pH do escoamento superficial, após a percolação em pavimento de concreto permeável, permanece na faixa de 6 a 8,8 (Brown & Borst, 2015; Nnadi et al., 2015). Resultados que estão de acordo com o obtido para todos os métodos. Apesar de o método Ngu

apresentar em 4 experimentos, com a vazão de 50 mL·min⁻¹, valores de pH entre 9 e 9,2 estes resultados se encontram dentro da faixa de pH da literatura apresentada quando avaliada a percolação de efluentes em colunas de concreto permeável (9 a 12) (Luck et al., 2008; Shabalala et al., 2017).

Os resultados obtidos neste estudo também se enquadram na resolução n. 357 (Brasil, 2005), que “dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências”, e com a resolução n. 430 que “dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes (Brasil, 2011).

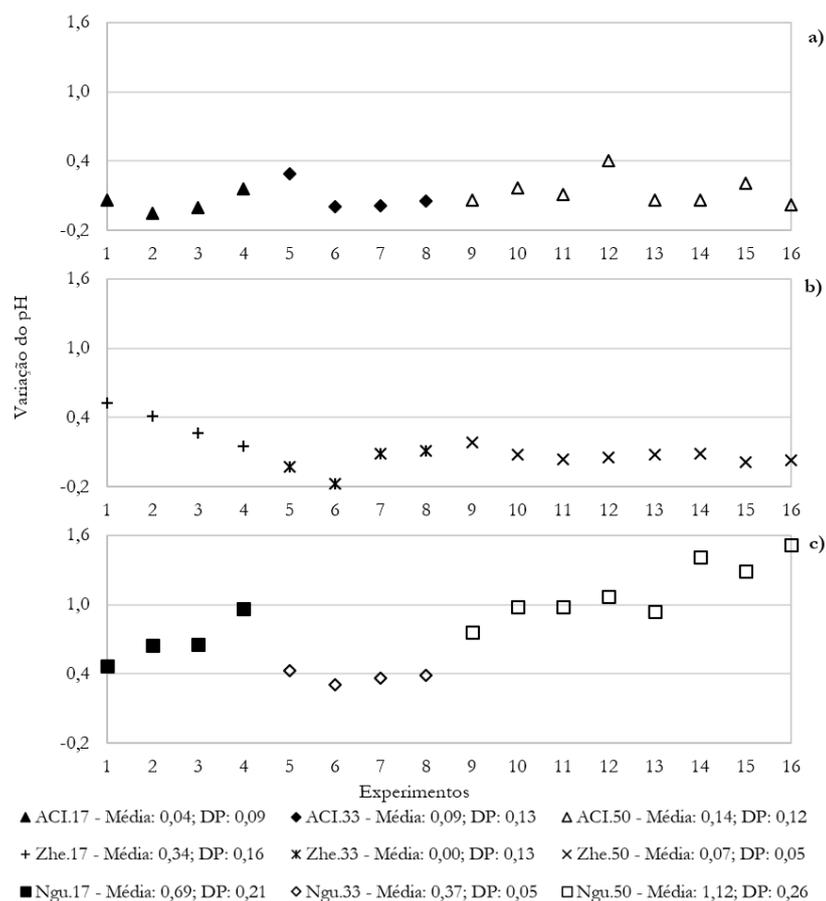


Figura 5 - Variação do pH (entrada menos saída) pelo pavimento de concreto permeável para as três vazões com os métodos de dosagem: a) ACI, b) Zhe, c) Ngu.

Métodos: ACI - American Concrete Institute (2010); Zhe - Zheng et al. (2012); Ngu - Nguyen et al. (2014). Vazões: 17 mL min⁻¹; 33 mL min⁻¹; 50 mL min⁻¹. Fonte: Autores (2021).

Avaliação da concentração de cobre, zinco, coliformes totais e *Escherichia coli* em função do método de dosagem do concreto permeável

A análise da concentração de cobre, zinco, coliformes totais e *Escherichia coli* foi realizada com a vazão intermediária de 33 mL min⁻¹, ou seja, foi avaliado somente a interferência do método de dosagem do concreto. Como neste estudo o escoamento superficial bruto foi mantido constante os resultados estão apresentados em valores absolutos.

Constatou-se com a ANOVA com intervalo de confiança de 95% que a concentração de zinco não apresentou diferença estatisticamente significativa em função do método de dosagem do concreto permeável ($p < 0,05$), entretanto, o mesmo não ocorreu para as concentrações de cobre e coliformes totais, portanto, para estes parâmetros foi realizado o teste de Tukey (Figura 6). Com o teste de Tukey é possível verificar quais métodos de dosagem apresentam diferença significativa, conforme as letras acima de cada barra do gráfico, métodos de dosagem que possuem a mesma letra não possuem diferença estatisticamente significativa.

O método Ngu apresentou os valores mais baixos de concentração para ambos os parâmetros, entretanto para a concentração de coliformes totais não apresentou diferença significativa com o

método Zhe. Portanto, para a remoção de zinco e cobre, e redução da concentração de coliformes totais, o método que apresenta melhor eficiência é o Ngu.

Os métodos ACI e Zhe obtiveram uma taxa de remoção semelhante para o cobre, 58,4 e 58,5%, respectivamente. Para o cobre, de acordo com a literatura, em geral a remoção é de 70 a 95% (Fassman & Blackbourn, 2010; Jiang et al., 2015; Myers et al., 2011; Vadas et al., 2017), remoção atingida pelo método Ngu, que foi de 76,2%.

A redução na concentração de zinco não apresentou diferença estatisticamente significativa de acordo com a ANOVA com intervalo de confiança de 95% para os três métodos de dosagem ($p < 0,05$), ficando na faixa de 76,2 a 77,5%, valores abaixo dos encontrados nos estudos analisados (Fassman & Blackbourn, 2010; Jiang et al., 2015), uma vez que a maior parte traz índices de remoção superiores a 90% ou a valores de concentração não detectáveis, sendo, entretanto, uma taxa de remoção bastante significativa. Essa diferença em relação à literatura consultada pode estar atrelada ao fato de a camada de revestimento dos estudos ser de asfalto permeável e não concreto permeável.

O método Ngu proporcionou uma elevada remoção dos metais pesados analisados, uma média de 76,2% para o zinco e 83,8% para o cobre. A alta taxa de remoção pode estar vinculada com o aumento do pH da água do escoamento superficial após a percolação, que manteve uma média de 8,3 a 9,2. De acordo com Cursino et al. (2004), quanto menor o pH da água, maior é a mobilidade de componentes metálicos, portanto a elevação do pH implicou na diminuição da mobilidade do cobre e do zinco, tendo como consequência a retenção de ambos.

Em relação a concentração de coliformes totais, a redução utilizando o concreto permeável dosado pelos três diferentes métodos foi superior a 95% em todos os experimentos, sendo que o método Ngu obteve uma remoção média de 99,6%, o Zhe de 98,6% e o ACI de 96,5%. A alta remoção de coliformes totais em todos os pavimentos pode estar atrelada a camada de base composta de areia fina através da qual o escoamento superficial percola, devido a formação do biofilme que realiza a retenção e controle de contaminantes microbiológicos (Haig et al., 2014; Kauppinen et al., 2014; Rittmann, 2018), ressaltando que as camadas de base estavam sempre úmidas no decorrer dos experimentos. A presença de *Escherichia coli*, em todas as amostras, inclusive do escoamento superficial in natura, não foi verificada.

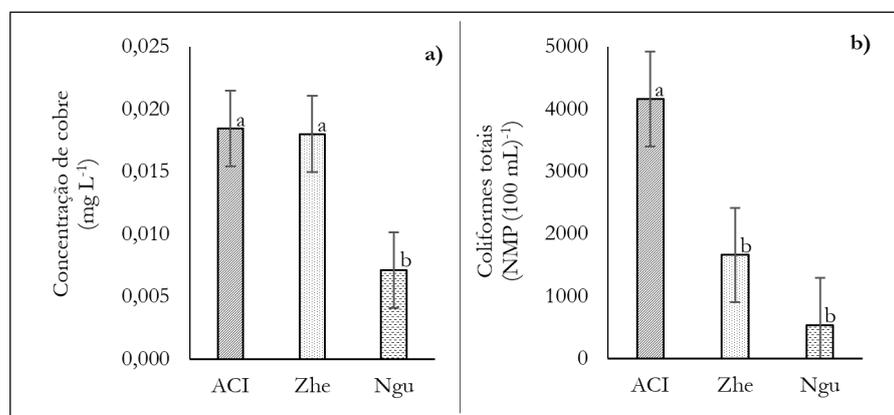


Figura 6 - Teste de Tukey sobre a concentração média do escoamento percolado: a) cobre, b) coliformes totais.

Métodos: ACI - American Concrete Institute (2010); Zhe - Zheng et al. (2012); Ngu - Nguyen et al. (2014).

Fonte: Autores (2021).

CONCLUSÕES

O valor médio de turbidez e cor aparente do escoamento superficial, após percolação pelo pavimento permeável diminuiu para os três métodos de dosagem do concreto permeável, sendo as maiores variações observadas nos métodos ACI e Nguyen et al. Segundo os resultados deste estudo, o intervalo entre eventos de chuva pode implicar em uma maior redução da turbidez da água do escoamento superficial.

O aumento no pH após a percolação do escoamento superficial no pavimento permeável foi maior com o método de Nguyen et al. A quantidade de pasta cimentícia não parece ser o único fator que interferiu diretamente no aumento do pH, uma vez que a maior elevação do pH pode estar relacionada com o fato de o método utilizar agregados menores que formam poros de menor tamanho e, conseqüentemente apresenta uma área superficial de contato entre o escoamento e o concreto maior.

As diferentes vazões aplicadas não interferiram nos resultados dos parâmetros turbidez e cor aparente, considerando os três métodos de dosagem. Entretanto, com o pH a interferência da vazão foi bem destacada com o método de Nguyen et al.

A utilização do pavimento permeável implicou em uma alta redução da concentração de coliformes totais para os três métodos de dosagem de concreto permeável, podendo estar relacionada a formação do biofilme na camada de areia fina que realiza a retenção de poluentes, assim como de coliformes.

Os três métodos de dosagem de concreto permeável reduziram a concentração de zinco e cobre. A redução da concentração de zinco, para os três métodos de dosagem de concreto permeável não apresentou diferença estatisticamente significativa. Enquanto o método de Nguyen et al. se mostrou mais eficaz na redução da concentração de cobre.

Dos três métodos de dosagem de concreto permeável analisados, o que apresentou o melhor efeito sobre a qualidade da água do escoamento superficial após a percolação em pavimento permeável foi o de Nguyen et al., pois apresentou os menores valores de concentração de cobre, coliformes totais, sendo que para a turbidez, cor aparente e concentração de zinco não houve diferença estatisticamente significativa com os demais métodos nem em função de diferentes vazões.

Para trabalhos futuros sugere-se estudos em pavimento permeável em escala piloto, para que assim, possa se verificar a retenção de poluentes do escoamento superficial com todas as adversidades que podem ocorrer em um pavimento (clima, temperatura, tráfego, dentre outros). Por fim, vê-se a necessidade de avaliar a percolação do escoamento superficial através do pavimento permeável de concreto permeável por um tempo maior. Assim, poder-se-á se ter uma melhor compreensão do amadurecimento das camadas de base do pavimento permeável e, seu efeito na percolação do escoamento superficial.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas – ANA. *HidroWeb*. Recuperado em 08 de outubro de 2021, de <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>
- American Concrete Institute – ACI. (2010). *Report on pervious concrete*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- Antunes, P. T. S. C. (2017). *Uso do pavimento permeável de concreto para atenuação de cheias urbanas*. (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Araújo, P. R., Tucci, C. E. M., & Goldenfum, J. A. (2000). Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 5, 21-29.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2015). *NBR 16416: pavimentos permeáveis de concreto - requisitos e procedimentos*. Rio de Janeiro: ABNT. 25 p.
- Back, Á. J. (2002). *Chuvas intensas e chuva de projeto de drenagem superficial no Estado de Santa Catarina*. Florianópolis: Epagri. 65 p.
- Back, Á., & Bonetti, A. (2014). Chuva de projeto para instalações prediais de águas pluviais de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(4), 260–267. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n4.p260-267>.
- Batezini, R. (2019). *Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental* (Tese de doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Beecham, S., Pezzaniti, D., & Kandasamy, J. (2012). Stormwater treatment using permeable pavements. *Proceedings of the ICE - Water Management*, 165(3), 161–170. <https://doi.org/10.1680/wama.2012.165.3.161>.
- Betim, L. S. (2013). *Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estados da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital – Viçosa/MG* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.
- Brasil. Agência Nacional de Águas – ANA. (2009). *Inventário: estações pluviométricas* (2. ed.). Brasília: ANA; SGH. 332 p.
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (2005). Resolução nº 357. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (2011). Resolução nº 430. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.

- Brasil. Ministério da Saúde. (2017). Portaria de consolidação n. 05: consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Braswell, A. S., Winston, R. J., & Hunt, W. F. (2018). Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina. *Journal of Environmental Management*, 224, 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.040>
- Brown, R. A., & Borst, M. (2015). Nutrient infiltrate concentrations from three permeable pavement types. *Journal of Environmental Management*, 164, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.038>
- Carls, B. (2018). *Coeficiente de permeabilidade, resistência mecânica e durabilidade de concreto permeável dosado por três diferentes métodos* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.
- Carls, B., Becker, N., & Pinheiro, I. G. (2018). Manejo de águas urbanas com pavimento de concreto permeável: métodos de dosagem e técnicas de manutenção. *Educação Ambiental Em Ação*, 20(75), 1-19.
- Castro, A. S. (2011). *Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle quali-quantitativo do escoamento superficial urbano* (Tese de doutorado). Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material: research findings and future prospects: a state-of-the-art review. *Construction & Building Materials*, 111, 262-274. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>
- Costa, F. B. P. (2019). *Análise e desenvolvimento de misturas de concreto permeável para aplicação em pavimentação* (Tese de doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Council, T. B., Duckenfield, K. U., Landa, E. R., & Callender, E. (2004). Tire-wear particles as a source of zinc to the environment. *Environmental Science & Technology*, 38(15), 4206-4214. <https://doi.org/10.1021/es034631f>
- Coutinho, A. P. (2011). *Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade de Recife* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Cursino, A. R., Santos, C. L., Liu, A. S., & Cho, L. Y. (2004). Comportamento do pH de água pluvial da cidade de São José dos Campos. *UniVap*, 86-88.
- Curvo, F. O. (2017). *Estudo da drenabilidade de calçadas experimentais em concreto permeável no Campus Armando Salles de Oliveira da USP* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Di Bernardo, L. (2003). *Tratamento de água para abastecimento por filtração direta*. Rio de Janeiro: ABES; RiMa, 2003. 498 p.
- Endreny, T. A., & Thomas, K. E. (2009). Improving estimates of simulated runoff quality and quantity using road-enhanced land cover data. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(4), 346-351. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2009\)14:4\(346\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2009)14:4(346))
- Fassman, E. A., & Blackbourn, S. (2010). Urban runoff mitigation by a permeable pavement system over impermeable soils. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(6), 475-485. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0000238](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0000238)
- Göbel, P., Dierkes, C., & Coldewey, W. G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(1-2), 26-42. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2006.08.008>
- Gonzalez, V., & Taylor, S. E. (2016). Asphaltene adsorption on quartz sand in the presence of pre-adsorbed water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 480, 137-145. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.07.014>
- Guo, H., Cheng, Y., Wang, L., Lu, S., & Jin, K. (2015). Experimental study on the effect of moisture on low-rank coal adsorption characteristics. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 24, 245-251. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.03.037>
- Haig, S. J., Quince, C., Davies, R. L., Dorea, C. C., & Collins, G. (2014). Replicating the microbial community and water quality performance of full-scale slow sand filters in laboratory-scale filters. *Water Research*, 61, 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.008>
- Hernández-Crespo, C., Fernández-Gonzalvo, M., Martín, M., & Andrés-Doménech, I. (2019). Influence of rainfall intensity and pollution build-up levels on water quality and quantity response of permeable pavements. *The Science of the Total Environment*, 684, 303-313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.271>

- Huang, J., He, J., Valeo, C., & Chu, A. (2016). Temporal evolution modeling of hydraulic and water quality performance of permeable pavements. *Journal of Hydrology*, 533, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.042>
- Huang, L., Ning, Z., Wang, Q., Qi, R., Zeng, Y., Qin, H., & Zhang, W. (2018). Molecular simulation of adsorption behaviors of methane, carbon dioxide and their mixtures on kerogen: effect of kerogen maturity and moisture content. *Fuel*, 211, 159-172. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.060>
- Jiang, W., Sha, A., Xiao, Ji., Li, Y., & Huang, Y. (2015). Experimental study on filtration effect and mechanism of pavement runoff in permeable asphalt pavement. *Construction & Building Materials*, 100, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.055>
- Kamali, M., Delkash, M., & Tajrishy, M. (2017). Evaluation of permeable pavement responses to urban surface runoff. *Journal of Environmental Management*, 187, 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.11.027>
- Kauppinen, A., Martikainen, K., Matikka, V., Veijalainen, A. M., Pitkänen, T., Heinonen-Tanski, H., & Miettinen, I. T. (2014). Sand filters for removal of microbes and nutrients from wastewater during a one-year pilot study in a cold temperate climate. *Journal of Environmental Management*, 133, 206-213. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.008>
- Kayhanian, M., Li, H., Harvey, J. T., & Liang, X. (2019). Application of permeable pavements in highways for stormwater runoff management and pollution prevention: california research experiences. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 8(4), 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2019.01.001>
- Lamb, G. S. (2014). *Desenvolvimento e análise do desempenho de elementos de drenagem fabricados em concreto permeável*. http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/114985?locale=pt_BR
- Lian, C., & Zhuge, Y. (2010). Optimum mix design of enhanced permeable concrete: an experimental investigation. *Construction & Building Materials*, 24(12), 2664-2671. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>
- Lima, G. T. S. (2018). *Influência da substituição total e parcial do agregado graúdo natural por agregado reciclado nas propriedades do concreto permeável* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Liu, J., & Borst, M. (2018). Performances of metal concentrations from three permeable pavement infiltrates. *Water Research*, 136, 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.02.050>
- Liu, Y., Li, T., & Yu, L. (2020). Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: A pilot-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118938>
- Luck, J. D., Workman, S. R., Coyne, M. S., & Higgins, S. F. (2008). Solid material retention and nutrient reduction properties of pervious concrete mixtures. *Biosystems Engineering*, 100(3), 401-408. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.03.011>
- Mariano, H. R. (2014). *Influência do teor de argamassa e da granulometria da brita na permeabilidade e nas resistências à compressão e à abrasão de concretos permeáveis* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- Marinho, M. N. (2018). *Experimentação e simulação da infiltração da água pluvial em um pavimento permeável* (Tese de doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Mbanaso, F. U., Charlesworth, S. M., Coupe, S. J., Newman, A. P., & Nnadi, E. O. (2019). Science of the total environment reuse of materials from a sustainable drainage system device : health, safety and environment assessment for an end-of-life pervious pavement structure. *The Science of the Total Environment*, 650, 1759-1770. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.224>
- Microsoft Corporation. (2020). Microsoft Excel (Software). Redmond, WA, EUA: Microsoft Corporation.
- Mikami, R. J. (2017). *Lixiviação de sulfato e metais pesados em concreto permeável* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa.
- Moura, J. M. B. M. (2020). *Proposição de método de dosagem de concreto permeável com incorporação de finos obtidos a partir da cominuição de resíduos* (Tese de doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.

- Murnane, J. G., Brennan, R. B., Healy, M. G., & Fenton, O. (2016). Assessment of intermittently loaded woodchip and sand filters to treat dairy soiled water. *Water Research*, *103*, 408-415. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.07.067>
- Myers, B., Beecham, S., & Van Leeuwen, J. A. (2011). Water quality with storage in permeable pavement basecourse. *Proceedings of the ICE. Water Management*, *164*(7), 361-372. <https://doi.org/10.1680/wama.2011.164.7.361>
- Neithalath, N., Sumanasooriya, M. S., & Deo, O. (2010). Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in pervious concretes for permeability prediction. *Materials Characterization*, *61*(8), 802-813. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.05.004>
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2013). *Tecnologia do concreto* (2. ed.). Porto Alegre: Bookman.
- Newman, A. P., Puehmeier, T., Kwok, V., Lam, M., Coupe, S. J., Shuttleworth, A., & Pratt, C. J. (2004). Protecting groundwater with oil-retaining pervious pavements: historical perspectives, limitations and recent developments. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, *37*(4), 283-291.
- Nguyen, D. H., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L., & Baraud, F. (2014). A modified method for the design of pervious concrete mix. *Construction & Building Materials*, *73*, 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.088>
- Nnadi, E. O., Newman, A. P., Coupe, S. J., & Mbanaso, F. U. (2015). Stormwater harvesting for irrigation purposes: an investigation of chemical quality of water recycled in pervious pavement system. *Journal of Environmental Management*, *147*, 246-256. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.020>
- Ono, B. W. (2018). *Análise do desempenho estrutural e hidráulico de um pavimento permeável com revestimento de blocos de concreto unidirecionalmente articulados* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Paula Júnior, A. C. (2019). *Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora.
- Pratt, C. J., Newman, A. P., & Bond, P. C. (1999). Oil biodegradation in permeable paving rainfall simulator. *Water Science and Technology*, *39*(2), 103-109.
- Razzaghmanesh, M., & Borst, M. (2019). Long-term effects of three types of permeable pavements on nutrient infiltrate concentrations. *The Science of the Total Environment*, *670*, 893-901. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.279>
- Reddy, K. R., Xie, T., & Dastgheibi, S. (2014). Removal of heavy metals from urban stormwater runoff using different filter materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *2*(1), 282-292. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.12.020>
- Revitt, D. M., Lundy, L., Coulon, F., & Fairley, M. (2014). The sources, impact and management of car park runoff pollution: a review. *Journal of Environmental Management*, *146*, 552-567. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.041>
- Ribas, L. V. S. (2017). *Experimentação e modelagem do comportamento hidrodinâmico de um pavimento permeável* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.
- Ribeiro, A. (2014). *Concreto permeável com agregados reciclados de resíduos de isoladores elétricos de porcelana* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.
- Risson, K. D. B. S. (2017). *Proposta de procedimento de moldagem de corpos de prova em laboratório para concretos permeáveis*. Recuperado em 08 de outubro de 2021, de <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2013.11.010>.
- Rittmann, B. E. (2018). Biofilms, active substrata, and me. *Water Research*, *132*, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.043>
- Sansalone, J., Kuang, X., Ying, G., & Ranieri, V. (2012). Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage. *Water Research*, *46*(20), 6763-6774. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.018>
- Santos, C. A. (2016). *Impacto da utilização de pavimentação permeável em áreas urbanas na recuperação de bacias hidrográficas*. Recuperado em 08 de outubro de 2021, de http://portalpos.unioeste.br/media/File/vanderleia.schmidt/Dissertacao_Cristiano_A_Santos.pdf
- Scholz, M., & Grabowiecki, P. (2007). Review of permeable pavement systems. *Building and Environment*, *42*(11), 3830-3836. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.016>

- Shabalala, A. N., Ekolu, S. O., Diop, S., & Solomon, F. (2017). Pervious concrete reactive barrier for removal of heavy metals from acid mine drainage – column study. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 641-653. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.027>
- Silva, R. G. (2019). *Estudo de concreto permeável como pavimento*. Recuperado em 08 de outubro de 2021, de <https://doi.org/10.2991/jiemi.2014.1.1.1>
- Silveira, A. L. L., & Goldenfum, J. A. (2007). Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12(2), 157-168. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v12n2.p157-168>
- Sumanasooriya, M. S., & Neithalath, N. (2011). Pore structure features of pervious concretes proportioned for desired porosities and their performance prediction. *Cement and Concrete Composites*, 33(8), 778-787. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.06.002>
- Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious concrete pavements*. Skokie: Portland Cement Association e Silver Spring; National Ready Mixed Concrete Association.
- Turco, M., Kodešová, R., Brunetti, G., Nikodem, A., Fér, M., & Piro, P. (2017). Unsaturated hydraulic behaviour of a permeable pavement: laboratory investigation and numerical analysis by using the HYDRUS-2D model. *Journal of Hydrology*, 554, 780-791. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.005>
- Vadas, T. M., Smith, M., & Luan, H. (2017). Leaching and retention of dissolved metals in particulate loaded pervious concrete columns. *Journal of Environmental Management*, 190, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.047>
- Yahia, A., & Kabagire, K. D. (2014). New approach to proportion pervious concrete. *Construction & Building Materials*, 62, 38-46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.025>
- Zheng, M., Chen, S., & Wang, B. (2012). Mix design method for permeable base of porous concrete. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 5(2), 102-107.
- Zipf, M. S., Knop, B., Pinheiro, I. G., & Valle, A. B. (2013). Avaliação da influência do descarte da primeira água de chuva, do tratamento por filtro lento e da altura da camada filtrante na qualidade da água de chuva. *Revista de Estudos Ambientais*, 15(1), 31-43. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.7867/1983-1501.2013v15n1p31-43>
- Zipf, M. S., Pinheiro, I. G., & Conegero, M. G. (2016). Simplified greywater treatment systems: slow filters of sand and slate waste followed by granular activated carbon. *Journal of Environmental Management*, 176, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.03.035>

Contribuição dos autores:

Nayara Becker: Concepção e execução da metodologia. Coleta e tratamento de dados. Análise e discussão dos resultados. Redação textual.

Mariana Garcia Conegero: Execução da metodologia e coleta de dados.

Ivone Gohr Pinheiro: Concepção da metodologia. Análise e discussão dos resultados. Revisão da redação.