

Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis

Determination of the infiltration capacity of permeable pavements

Andrea Sartori Jabur¹, Fernando Dornelles², André Luiz Lopes da Silveira², Joel Avruch Goldenfum²,
Cristhianne Michiko Passos Okawa³ e Romulo Ruiz Gasparini⁴

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, PR, Brasil

jabur@utfpr.edu.br

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

fds_eng@gmail.com; andre@iph.ufrgs.br; j.goldenfum@gmail.com

³ Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil

crisokawa@yahoo.com.br

⁴ Companhia de Saneamento do Estado do Paraná, Londrina, PR, Brasil

romulorgeng@gmail.com

Recebido: 27/05/14 - Revisado: 07/04/15 - Aceito: 27/07/15

RESUMO

O objetivo deste artigo é a análise da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis por meio do uso da Norma ASTM (American Society for Testing and Materials) C1701 - Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete e da metodologia do infiltrômetro de anéis concêntricos. Os pavimentos avaliados foram o asfalto poroso e o bloco de concreto intertravado vazado (modelo "S"), ambos executados em um estacionamento do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), em 2004, localizado na cidade de Porto Alegre. Os resultados obtidos revelaram que os pavimentos apresentam colmatção, devido ao uso e a falta de manutenção, ao longo do tempo. Os resultados obtidos apresentaram valores de taxa de infiltração entre $8,9 \times 10^{-6}$ m/s e 19×10^{-6} m/s para o asfalto poroso e superiores a 10^{-5} m/s no bloco de concreto intertravado vazado, valores estes que equivalem ao grau de permeabilidade de médio a baixo. Avaliando os valores obtidos no asfalto poroso, o bloco de concreto intertravado vazado apontou uma capacidade de infiltração superior, com grau de permeabilidade média. Evidenciou-se que o asfalto poroso no módulo experimental é o menos resistente em relação ao uso, pois, após 9 anos, este perdeu de modo significativo a sua capacidade de infiltração, diferenciando do bloco de concreto intertravados vazado. Esta redução ocorreu devido à falta de manutenção dos pavimentos, que foi propositalmente definida durante a instalação do experimento, de modo a avaliar as condições reais de uso.

Palavras Chave: Teste de Infiltração. Norma ASTM C1701. Infiltrômetro de anéis concêntricos. Pavimentos Permeáveis.

ABSTRACT

The purpose of this article is to evaluate the capability of permeable pavement infiltration by using the ASTM Standards (American Society for Testing and Materials - C1701 - Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete) and by using the ring infiltrometer. The permeable pavements evaluated were porous asphalt and interlocking concrete pavers (model "S"), both manufactured in a parking lot of the Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), in 2004, located in the city of Porto Alegre, Brazil. The results indicated the clogging of the pavements due to use and lack of maintenance over time. The results showed the infiltration rate between $8,9 \times 10^{-6}$ m/s and 19×10^{-6} m/s for the porous asphalt and values greater than 10^{-5} m/s for the interlocking concrete pavers, which correspond to the medium to low degree of permeability. By analyzing the values obtained for porous asphalt, the interlocking concrete pavers presented a higher infiltration capacity, with a medium degree of permeability. It was observed that the porous asphalt in the experimental module was less resistant to use since it significantly lost infiltration capacity after nine years of use. The interlocking concrete pavers did not present the same behavior. This reduction of resistance was due to the lack of pavement maintenance, which was deliberately set during installation of the experiment in order to evaluate the real conditions of use.

Keywords: Infiltration test. ASTM C1701. Ring Infiltrometer. Permeable Pavements.

INTRODUÇÃO

O século XX foi marcado pelo crescimento urbano, priorizando-se a verticalização das edificações nos centros urbanos, elevando-se a impermeabilização do solo e conseqüentemente na redução de espaços públicos.

Este fator de desequilíbrio nos núcleos urbanos ocasionou diferentes impactos ambientais e sociais, como por exemplo: a falta de moradia, de saneamento básico e as inundações urbanas. Apesar do sistema de drenagem pluvial urbana existir em quase todas as cidades brasileiras, devido a sua inserção pelo engenheiro sanitarista Saturnino de Brito no início do século XX, não ocorreram controle da impermeabilização do solo e o descarte de resíduos sólidos nas vias públicas.

A drenagem urbana tem sido projetada pelos engenheiros com o princípio de escoar a água de precipitações, em um período curto de tempo, dos pontos altos para os fundos de vale. Este tipo de solução transfere a problemática da inundação de um ponto para o outro. A ocupação das áreas ribeirinhas resulta em prejuízos evidentes (sociais, econômicos e ambientais) quando o rio inunda seu leito de cheia (GONÇALVES; POLIDORO; M.; DA SILVA, 2009).

Com os cenários de inundações urbanas em várias cidades, profissionais de diversas áreas buscaram novas tecnologias visando o acréscimo da infiltração e a redução do escoamento superficial. Um exemplo deste tipo de abordagem é o uso de pavimentos permeáveis. Estes pavimentos são capazes de reduzir o volume do escoamento superficial em comparação aos pavimentos convencionais, privilegiando a infiltração e a retenção da água no subsolo.

REVISÃO TEÓRICA

Para controlar a impermeabilização das superfícies nas grandes cidades, é comum as prefeituras exigirem, através de seu Plano Diretor, que uma parcela de área do terreno seja mantida permeável, variando entre 15% a 30% do terreno. Porém, nem sempre é possível atender este requisito, como por exemplo, os estacionamentos de centros de compras ou de supermercados. Uma forma de conseguir atender a legislação das cidades e ao mesmo tempo manter a área útil do terreno é por meio da instalação de pavimentos permeáveis (MARCHIONI; SILVA, 2011).

Sistemas de pavimentos permeáveis são conhecidos por ser uma medida de controle de origem eficaz e são utilizados para atenuar os efeitos adversos do escoamento de águas pluviais urbanas, tais como aumento volume de escoamento e deterioração da qualidade da água receptora. Pavimentação permeável pode ser usada como uma alternativa as superfícies convencionais, tais como estradas, vias públicas, estacionamentos e calçadas (BEECHAM et al., 2010 apud LUCKE; BEECHMAM, 2011).

Os pavimentos permeáveis são constituídos normalmente de concreto ou asfalto convencionais, dos quais foram retiradas as partículas mais finas (ou seja, menores de 600 µ) (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000; FASSMAN; BLACKBOURN, 2010; MARCHIONI; SILVA, 2011). Segundo Pinto (2011), para o pavimento ser considerado permeável deve

apresentar vazios interligados.

Existem vários tipos de revestimentos que podem ser considerados permeáveis, sendo os mais comuns: os blocos de concreto, podendo este ser vazados ou não e o revestimento poroso, conhecido no Brasil como concreto asfáltico poroso ou também denominado de camada porosa de atrito. Além dessas superfícies tradicionais, existem os pavimentos construídos com módulos de blocos de concretos vazados (BEELDENS et al., 2008) ou os blocos de concreto intertravados, com infiltração pelas juntas (FERGUSON, 2005 apud YONG; MCCARTHY; DELETIC, 2013). Pavimento permeável é composto de uma medida de infraestrutura sustentável que promova a restauração hidrológica e controle da poluição difusa (SANSALONE et al., 2012).

Depois que a água infiltra pela superfície porosa é temporariamente armazenado em um reservatório preenchido apenas com brita subjacente (denominado de “leito de recarga”) e lentamente liberado para o solo (Figura 1). Uma manta geotêxtil é colocada entre o reservatório de brita e o solo, de modo a evitar a obstrução desta pelo solo local. Em alguns casos, utiliza-se a manta geotêxtil entre o asfalto ou concreto poroso e o reservatório de brita, de modo a formar um “envelope” em todo o reservatório de brita (FASSMAN; BLACKBOURN, 2010).

A capacidade de carga (resistência ao peso) do pavimento poroso é menor que pavimentos convencionais, devido à ausência das partículas finas. Portanto, os grandes veículos (como caminhões, ônibus entre outros) não são aconselhados a estacionarem em locais construídos de pavimentos porosos. Em vantagem, ao se projetar um pavimento poroso, terá a redução do sistema tradicional de águas pluviais e as bacias de retenção não se fazem necessárias (MCNALLY; DEPROPO; JOUBERT, 2007).

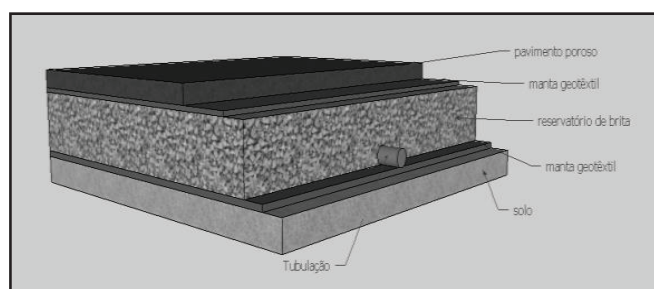


Figura 1 - Sistema esquemático de um pavimento poroso
Fonte: Adaptado de Marchioni e Silva (2011)

Os Pavimentos de blocos de concreto intertravados, usualmente denominados de pavers, são confeccionados de concreto e interligados entre si, mas mantendo uma junta de separação, permitindo a infiltração da água pluvial para o reservatório de brita (BEELDENS et al., 2008; FASSMAN; BLACKBOURN, 2010; MARCHIONI; SILVA, 2011; SMITH, 2006). A espessura da sub-base de brita e o tipo de granulometria irão definir a capacidade de infiltração e retenção da água pluvial, conforme ilustra a figura 2.

A seção tipo de um pavimento de blocos de concreto intertravados consiste primeiramente no subleito, constituído de solo compactado, em torno de 15 cm. Depois é inserida a

base, constituída de material granular, com espessura mínima de 10 cm. Após a instalação da base, é posicionada a camada de assentamento, composta por material granular, com distribuição granulométrica definida, que tem a função de acomodar as peças de concreto, proporcionando correto nivelamento do pavimento e permitindo variações na espessura das peças de concreto. Por último, a camada de revestimento é composta pelas peças de concreto e material de rejuntamento (VIEIRA; SILVA, 2010).

O material de rejuntamento é composto, na maioria dos casos, por areia e no uso de blocos vazados estes podem ser preenchidos com grama (CANHOLI, 2005; MCNALLY; DEPROSPO; JOUBERT, 2007; FASSMAN; BLACKBOURN, 2010; URBONAS; STAHLRE, 1993 apud ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

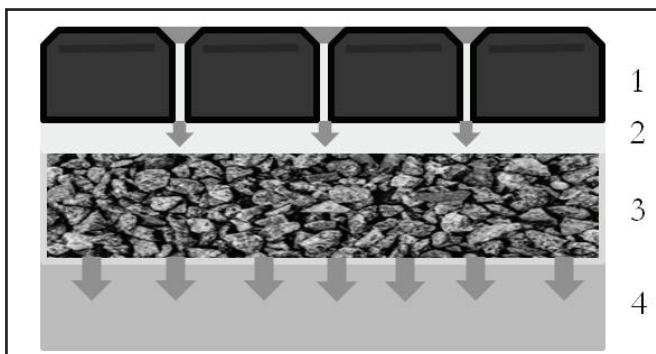


Figura 2 - Instalação de Blocos de concreto intertravado: 1- Paver, 2- Cama de areia, 3- reservatório de brita ou sub-base e 4 - solo local
Fonte: adaptado de Beeldens et al. (2008)

O objetivo deste artigo é a avaliação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis por meio da Norma ASTM (American Society for Testing and Materials) C1701 – Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete (ASTM, 2009) e da metodologia do infiltrômetro de anéis concêntricos. Os pavimentos estudados foram asfalto poroso e bloco de concreto intertravado vazado (modelo “S”), ambos instalados em um estacionamento no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), em 2004, em Porto Alegre.

O EXPERIMENTO

No ano de 2004, foi construído nas dependências do IPH/UFRGS um módulo experimental, constituído em um estacionamento para automóveis com duas tipologias de pavimento permeável (bloco de concreto intertravado vazado também denominado de bloco vazado e asfalto poroso), para a avaliação da capacidade de infiltração e da qualidade da água. O experimento apresenta uma área superficial de 264 m², conforme ilustram as figuras 3a e 3b.

O pavimento se caracteriza por ter tráfego de veículos leves, servindo basicamente como estacionamento para servidores e alunos. A área do estacionamento foi dividida em duas partes iguais e independentes. Um dos lados do pavimento foi construído com blocos de concretos intertravados vazados, modelo “S”. Os blocos possuem as seguintes dimensões: 22

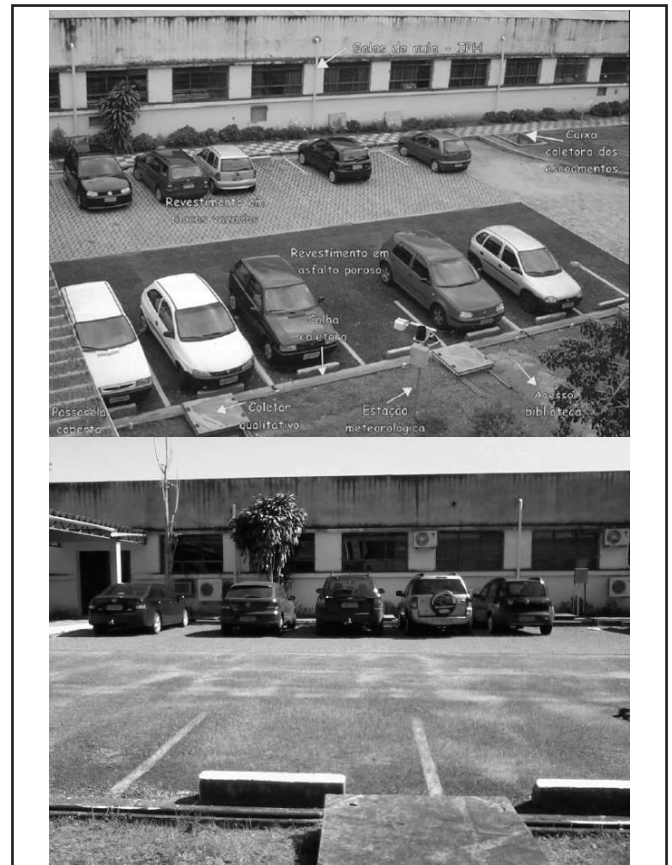


Figura 3a e 3b: Vista do módulo experimental do IPH/UFRGS
Fonte: Acioli (2005) e Jabur (2013)

cm de largura, 11 cm de base e 8 cm de espessura. A parte vazada (dos blocos) foi preenchida com solo local e gramínea (ACIOLI, 2005).

Outra parte do estacionamento foi executada o asfalto poroso pré-misturado a frio com a granulometria aberta. O traço utilizado para este asfalto foi de 60% de brita 3/4, 40% de brita 3/8 e 5% do volume de agregados em emulsão asfáltica (ACIOLLI, 2005).

Em ambos os pavimentos permeáveis instalou-se um reservatório preenchido com brita, de modo a armazenar o volume de água pluvial para posterior infiltração. O reservatório é composto por brita de diferentes granulometrias, apresentado na tabela 1:

Tabela 1 - granulometria dos reservatórios de ambos os pavimentos

Peneira	Passante (%)
1 ”	100
3/4 ”	99,9
1/2 ”	96,4
3/8 ”	52,1
Nº 4	6,2
Nº 10	3,6
Nº 40	2,9
Nº 80	2,3
Nº 200	1

Fonte: Malysz (2003) apud Acioli (2005)

Estabeleceu-se, desde a instalação do experimento, a não manutenção ou limpeza dos dois pavimentos, buscando-se caracterizar uma condição de negligência e definir a vida útil dos materiais (Figuras 4a e 4b).

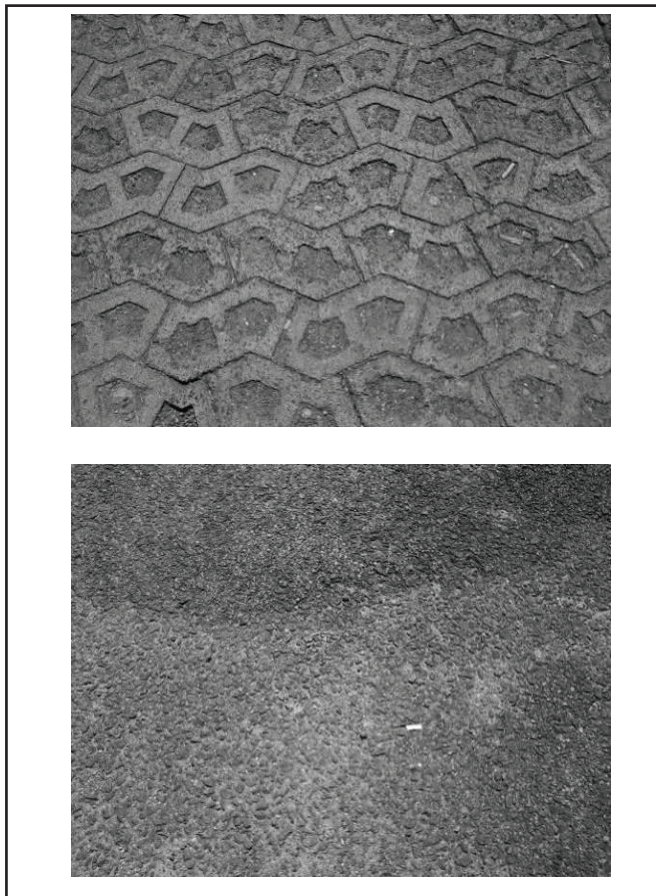


Figura 4a e 4b: Condições dos pavimentos em 2012
Fonte: Jabur (2013)

O asfalto poroso apresentou uma parte com colmatagem, prejudicando a infiltração e gerando maior escoamento superficial.

O pavimento com bloco vazado apresentou colmatagem nas áreas vazadas e crescimento da vegetação rasteira em partes do estacionamento, que auxiliavam retenção de água pluvial.

METODOLOGIA

Para avaliar as condições dos pavimentos permeáveis do experimento, optou-se pelo uso de duas metodologias: o da Norma Americana ASTM C1701 e do infiltrômetro de anéis concêntricos.

A Norma ASTM C1701 indica o teste de infiltração através do uso do cilindro único, com diâmetro de 300 mm, com uma carga hidráulica de 1,0 1,5 cm de altura e um volume de água pré-determinado.

Primeiramente é limpo o local do teste, através da varrição e retirada dos detritos locais. Fixa-se o cilindro na superfície do pavimento com o auxílio da massa de calafetar (Figuras 5a e 5b).

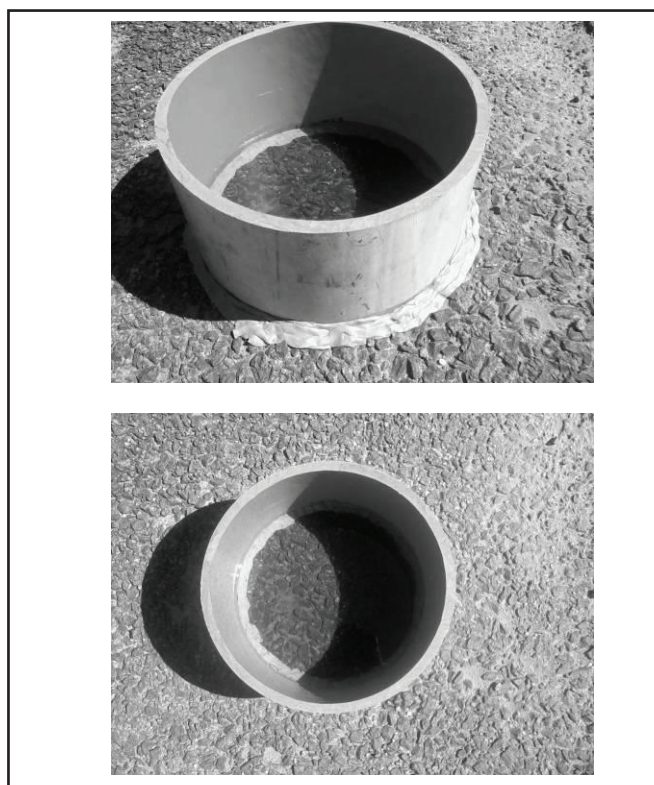


Figura 5a e 5b: Cilindro instalado com massa de calafetar
Fonte: Jabur (2013)

A Norma ASTM C1701 estipula um total de $3,60 \pm 0,05$ kg de água, para a pré-molhagem, que no caso foi de 3,6 L. O tempo de infiltração, medido por um cronômetro, era definido assim que a água atingia a superfície do pavimento permeável e finalizado quando não houvesse mais lâmina de água na superfície.

O teste de infiltração era iniciado em até 2 minutos depois da pré-molhagem, conforme estipulado pela metodologia. Segundo a norma, se o tempo de infiltração da pré-molhagem fosse inferior a 30 s, utiliza-se para o ensaio o total de $18 \pm 0,05$ kg de água (18 Litros). Se o tempo for superior a 30 s, utiliza-se $3,60 \pm 0,05$ kg de água (3,6 litros), mantendo-se a carga hidráulica de 1 à 1,5 cm. Para a determinação do coeficiente de infiltração, utilizou-se a equação 1, apresentada pela norma ASTM C1701, conforme a seguir:

$$I = \frac{K \cdot M}{(D^2 \cdot t)} \quad (1)$$

em que: I é o coeficiente de infiltração (mm/h); M é a massa de água infiltrada (kg); D é diâmetro interno do cilindro de infiltração (300 mm); t é o tempo de infiltração (s); K é o fator de conversão, igual à 4.583.666.000 (Sistema Internacional).

Para o Infiltrômetro de anéis concêntricos, adotou-se a metodologia descrita em Bean et al. (2004). O diâmetro cilindro externo do infiltrômetro utilizado foi de 300 mm e do interno foi de 150 mm, ambos confeccionados em inox.

Este infiltrômetro era instalado com o uso da massa de calafetar na superfície do pavimento. No cilindro interno,

fixou-se a trena, para a leitura da carga hidráulica. Manteve-se a carga hidráulica constante, tanto no cilindro externo como no cilindro interno, conforme ilustra as figuras 6a e 6b.

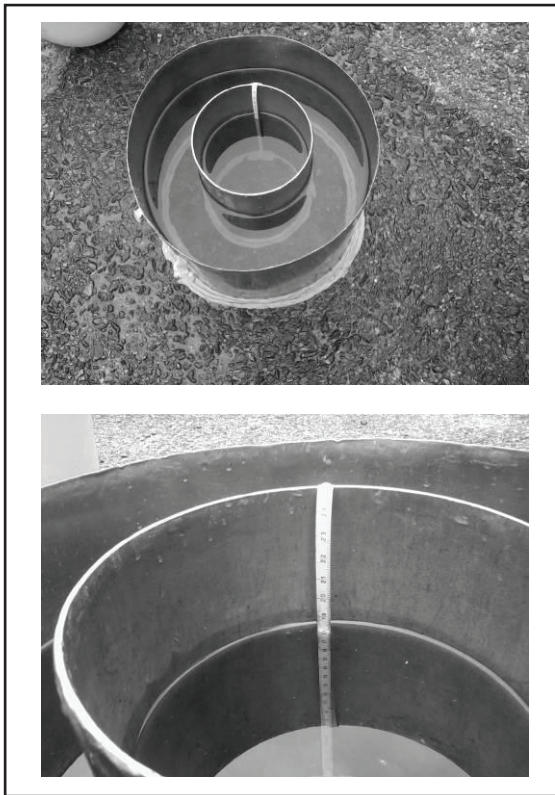


Figura 6a e 6b: Infiltrômetro de anéis concêntricos instalado no asfalto poroso
Fonte: Jabur et.al. (2013)

Iniciou-se a contagem de tempo para a infiltração da água no pavimento permeável à partir da leitura do nível de água no cilindro interno. Ocorria acréscimo de água sempre que o nível de água de ambos os anéis chegava próximo dos 10 cm de carga hidráulica.

Eram realizadas leituras da altura da carga hidráulica no interior do cilindro interno a cada 5 min. Considerou-se que o solo atingiu a chamada taxa de infiltração estável, quando o valor da leitura repetia-se por pelo menos três vezes.

Como descrito por Mantovani, Bernardo e Palaretti (2009) a velocidade de Infiltração Básica e a equação do modelo de Kostiakow foram calculados com o uso da regressão linear, considerando que a equação da infiltração é um equação exponencial. Assim tem-se que a equação de Kostiakow:

$$I = K' \cdot T^A \quad (2)$$

Sendo que: I é a infiltração acumulada (cm); K' é a constante dependente do solo, T é tempo de infiltração (minutos) e A é constante dependente do solo, variando de 0 a 1.

Logo, utilizando a regressão linear, a equação (2) é representada no seguinte modo (equação 3):

$$\log I = \log K + A \log T \quad (3)$$

Dessa forma, a equação da infiltração é considerada como uma reta do tipo $Y = A + BX$. Para determinar as constante A e B, utilizou-se das seguintes equações (equações: 4, 5 e 6):

$$B = \frac{\sum(X \cdot Y) - (\sum X \cdot \sum Y)}{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}} \quad (4)$$

Onde N é o número de pares de X e Y.

$$A = Y_{med} - B \cdot X_{med} \quad (5)$$

$$K = 10^A \quad (6)$$

E por último, determina-se a Velocidade de Infiltração Básica (VIB) do experimento ilustrada na equação (7):

$$VIB = 60 \cdot B \cdot K' \cdot \left(\frac{-0,01}{60 \cdot K' \cdot B \cdot (B - 1)} \right)^{\frac{(B-1)}{(B-2)}} \quad (7)$$

Após a determinação da VIB, optou-se em ajustar a equação do Modelo de Horton (8) (TUCCI, 2005):

$$f = f_c + (f_0 + f_c) \cdot e^{-\beta t'} \quad (8)$$

Onde: f é a capacidade de infiltração (mm/h); f_c é a capacidade de infiltração final (condição de solo saturado, em mm/h); f_0 é a capacidade de infiltração inicial (condição de solo seco, em mm/h); β é a constante que depende do experimento (horas) e t' é o tempo de infiltração (horas).

Com os resultados obtidos nos experimentos partiu-se para um tratamento estatístico, para a retirada de outliers, aplicando a metodologia do critério de Chauvenet. Com os resultados ajustados, obtiveram-se as curvas de infiltração e a equação modelo de Horton.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa de pavimento permeável, no IPH, iniciou-se em 2003, onde se realizou o dimensionamento da estrutura e o detalhamento dos dispositivos de monitoramento. Em 2004, foi realizada a primeira etapa do monitoramento hidrológico por Aciolli (2005). Uma segunda etapa do monitoramento foi efetuada nos anos de 2007, 2008 e 2009 por Castro et al. (2013). Os resultados eram obtidos através dos sensores de monitoramento instalados nos reservatórios preenchidos com brita (para o monitoramento do nível de água e o esgotamento). Para a determinação do escoamento superficial, instalaram-se em cada lado do pavimento, calhas que conduzem a água superficial a um vertedor triangular para a medição de sua vazão.

Os resultados da primeira e da segunda etapa de monitoramento estão ilustrados nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Coeficientes de escoamento superficial dos Pavimentos permeáveis (Primeira Etapa)

Evento	P* (mm)	Duração Chuva (h:min)	Coef. de Escoamento (%)	
			Asfalto Poroso	Blocos Vazados
04/05/2004	62,5	22:03	SD	0,0
07/05/2004	32,2	42:02	SD	1,4
14/05/2004	22,6	28:26	0,8	0,0
23/05/2004	9,1	4:52	SD	0,0
25/05/2004	23,4	5:52	SD	0,0
10/06/2004	83,1	13:55	5,0	1,0
24/06/2004	20,1	11:34	0,7	0,0
01/07/2004	30,7	6:40	SD	0,0
03/07/2004	24,4	6:39	1,8	1,8
07/07/2004	9,7	3:38	0,0	0,0
14/07/2004	35,6	26:07	7,3	0,0
30/07/2004	55,1	39:33	9,5	0,0
06/08/2004	20,8	5:22	3,6	5,4
17/08/2004	32,5	42:43	6,1	3,8
10/09/2004	46,2	27:11	8,2	1,1
20/09/2004	115,8	59:19	7,7	9,8
28/09/2004	20,8	5:22	3,6	5,4
16/10/2004	37,1	12:00	6,2	4,5
18/10/2004	15,2	0:57	7,2	3,0
03/11/2004	18,5	3:50	2,2	0,0
05/11/2004	17,0	10:35	3,0	0,0
10/11/2004	90,4	48:28	13,5	12,8
		Média	5,08	2,27
		Desvio Padrão	3,62	3,49

SD – Sem dados. P* - precipitação

Fonte: Acioli, 2005 apud Castro et al. (2013)

Observando os resultados da primeira etapa, o pavimento poroso apresentou valores superiores de escoamento superficial, em relação aos blocos vazados. Em um evento no dia 30/07/2004, o asfalto poroso obteve 9,5% de escoamento superficial e o bloco vazado apresentou valor igual à 0 (zero) %. A média estabelecida por Acioli (2005) apud Castro et al. (2013) foi de 5,08% para o pavimento poroso e 2,27% para os blocos vazados.

Segundo Castro et al. (2013), os resultados obtidos no período entre 2007 e 2009 comprovaram o processo de deterioração dos pavimentos e a perda da capacidade de infiltração. O asfalto poroso obteve-se um escoamento superficial máximo de 61,4% (16/08/2008) em comparação ao bloco vazado, de apenas 1%, no mesmo evento observado. A média estabelecida para o asfalto poroso foi de 29,1% e para o bloco vazado de 6,5%.

Considerando os valores do revestimento de asfalto poroso, este valor de 61,4% superou em 4,55 vezes o maior valor do escoamento superficial obtido por Acioli (2005), que é de 13,5%. Para o revestimento de bloco vazado, o aumento do escoamento superficial estabilizou-se em 17,2%, sendo de 12,8% o valor máximo obtido na primeira etapa de 15% para a segunda etapa (CASTRO et al., 2013).

Tabela 3 - Coeficientes de escoamento superficial dos Pavimentos permeáveis (Segunda Etapa)

Evento	P* (mm)	Duração Chuva (h:min)	Coef. de Escoamento (%)	
			Asfalto Poroso	Blocos Vazados
24/12/2007	25,1	04:30	3,7	5,8
28/12/2007	26,9	21:15	20,2	11,2
30/01/2008	29,6	93:45	0,0	0,0
09/02/2008	71,0	81:45	1,4	s.d.
28/05/2008	66,3	34:55	18,5	1,0
07/06/2008	71,6	55:00	SD	7,5
27/07/2008	139,5	71:50	48,5	5,1
16/08/2008	84,8	117:55	61,4	1,0
05/09/2008	100,4	51:30	10,7	0,0
04/10/2008	28,1	12:15	34,0	9,0
25/10/2008	64,8	41:55	58,0	14,0
08/01/2009	23,5	14:05	22,0	0,0
07/07/2009	39,4	54:35	41,0	6,0
01/08/2009	22,7	06:35	22,0	11,0
06/08/2009	193,3	102:00	51,0	SD
17/08/2009	62,1	94:35	44,0	11,0
24/10/2009	33,9	15:45	SD	15,0
		Média	29,1	6,5
		Desvio Padrão	20,7	5,3

SD – Sem dados. P* - precipitação

Fonte: Castro et al. (2013)

Tabela 4 - Valores do Teste de Infiltração ASTM C1701

Pavimento	Tempo (s)	I (mm/h)	I (m/s)
Asfalto Poroso			
1	5720	32,0	8,90.10 ⁻⁶
2	2244	81,7	2,30.10 ⁻⁵
3	2650	69,2	1,90.10 ⁻⁵
4	1500	166,7	4,60.10 ⁻⁵
Média			1,93.10 ⁻⁵
Desvio Padrão			2,05.10 ⁻⁵
Bloco vazado			
1	1820	100,7	2,79.10 ⁻⁵
2	2820	65,0	1,81.10 ⁻⁵
3	1075	170,6	4,74.10 ⁻⁵
4	1127	162,7	4,51.10 ⁻⁵
Média			3,45.10 ⁻⁵
Desvio Padrão			1,40.10 ⁻⁵

A diferença comportamental do controle de escoamento nos revestimentos era esperada, pois o bloco vazado, por apresentar aberturas maiores em comparação ao asfalto poroso, manteve-se a redução de escoamento superficial, pois estes “vazios” funcionam como reservatórios, onde mesmo que a chuva exceda a capacidade de infiltração, existe o armazenamento da chuva excedente (ACIOLLI, 2005 apud CASTRO et al., 2013).

A metodologia adotada neste artigo não visa determinar o coeficiente de escoamento superficial, diferenciando dos resultados anteriores, mas em auxiliar na análise da alteração da

capacidade de infiltração do pavimento permeável.

Realizou-se o teste de infiltração em ambos os pavimentos permeáveis, de modo a estimar a atual capacidade de infiltração. Para apresentar os resultados obtidos optou-se em dividir em duas partes: os resultados obtidos com o experimento da Norma ASTM C1701 e os resultados obtidos com a metodologia do infiltrômetro de anéis concêntricos.

Os resultados obtidos com o uso da metodologia da Norma Americana ASTM C1701 estão ilustrados na tabela 4, onde se realizaram os testes no asfalto poroso e no bloco vazado.

Para identificar o grau de infiltração dos pavimentos, pois a Norma ASTM C1701 não identifica valores para comparação dos resultados obtidos, considerou-se os coeficientes de permeabilidade dos solos (Terzagui; Peck, 1967 apud Marchioni; SILVA, 2011) em comparação com os resultados dos ensaios (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores típicos de taxa de infiltração de solos

Tipo de Solo	Coefficiente de permeabilidade K (m/s)	Grau de permeabilidade
Brita	$>10^{-3}$	Alta
Areia de brita, areia limpa, areia fina	10^{-3} a 10^{-5}	Média
Areia, areia suja e silte arenoso	10^{-5} a 10^{-7}	Baixa
Silte, silte argiloso	10^{-7} a 10^{-9}	Muito Baixa
Argila	$< 10^{-9}$	Praticamente Impermeável

Fonte: Terzagui; Peck (1967) apud Marchioni e Silva (2011)

Segundo Marchioni e Silva (2011) para classificar um revestimento como pavimento poroso seus valores de capacidade de infiltração devem ser superiores a 10^{-5} m/s.

Os valores de infiltração para o asfalto poroso estabeleceram-se entre $8,9.10^{-6}$ m/s e $1,9.10^{-5}$ m/s, porém um dos testes apresentou a capacidade de infiltração nula, significando uma superfície impermeável no ponto o qual o cilindro foi instalado. Considerando os valores a tabela 5 a média calculada do asfalto poroso é de $1,93.10^{-5}$ e este ficou estabelecido com capacidade de infiltração comparado a areia, areia suja e silte arenoso.

Os resultados também ilustram que o pavimento permeável possui um revestimento heterogêneo com locais onde apresentam menores índices de permeabilidade em relação a outros. Os resultados do revestimento de bloco vazado apresentaram valores superiores a 10^{-5} m/s, entre $2,79$ a $4,74.10^{-5}$ m/s, mantendo a característica de um pavimento permeável.

Considerando a média obtida pelo experimento o asfalto poroso alcançou $1,93.10^{-5}$ m/s e o bloco vazado de $3,45.10^{-5}$ m/s, sendo a diferença percentual de 44,06%. Esta diferença de valores condiz com a confirmação apresentada por Aciolli (2005) e Castro et al. (2013) a qual o asfalto poroso tende a gerar

maior escoamento superficial em comparação ao bloco vazado.

Com o uso do infiltrômetro de anéis concêntricos determinou-se a velocidade de infiltração utilizando-se a metodologia descrita em Mantovani et al. (2009). Com a velocidade de infiltração ajustou-se a equação de Horton.

Calculou-se primeiramente a infiltração acumulada com os dados da tabela e seguiu-se determinando a velocidade de infiltração, em mm/h. Com estes dados obteve-se a VIB com o valor de 3,28 mm/h, valor de infiltração baixo, porém condizente com as condições atuais do pavimento poroso (Figura 7). A equação da Infiltração Acumulada obtida foi (equação 9):

$$I = 57,10.T^{0,131} \tag{9}$$

Onde: I é a infiltração acumulada (mm) e o T em minutos.

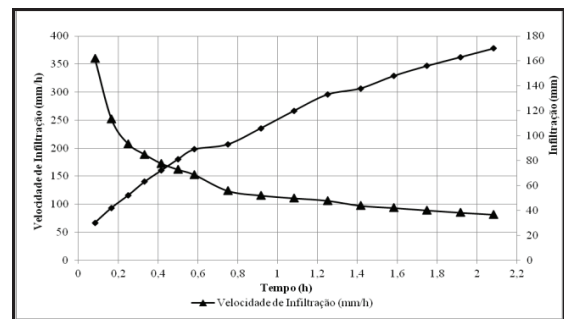


Figura 7 – Curvas de infiltração acumulada e velocidade de infiltração para o asfalto poroso

Com a equação ajustada determinou-se a infiltração inicial (F_0) e a infiltração final (F_c) da equação de Horton, na qual resultou em valores de 208,306 mm/h (F_0) e 71,88 mm/h (F_c). Obteve-se a constante β igual a -1,83.

Logo, a equação representativa de Horton estabeleceu-se em (equação 10 e Figura 8):

$$F(t) = 71,88 + (136,426).e^{-1,83T} \tag{10}$$

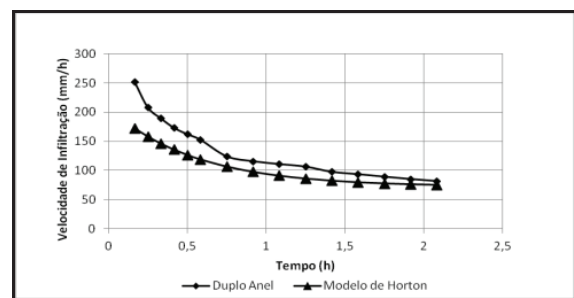


Figura 8 - Resultados do infiltrômetro de anéis concêntricos e a Equação de Horton, para o asfalto poroso

Realizou-se o mesmo procedimento para o pavimento bloco vazado. Com os dados do experimento determinou-se da VIB em 199,93 mm/h, valor considerado alto, que pode ter advindo por causa dos vazamentos da água e a dificuldade de instalação do equipamento (Figura 9). A equação da Infiltração Acumulada obtida foi (equação 11):

$$I = 14,51 \cdot T^{0,839} \quad (11)$$

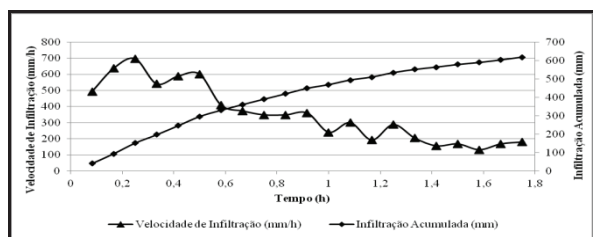


Figura 9 - Curvas de infiltração acumulada e velocidade de infiltração para o bloco vazado

Com os resultados partiu-se para a determinação da equação de Horton (equação 12), que resultou em:

$$F(t) = 138,675 + (548,84)e^{-2,018 \cdot t} \quad (12)$$

A Figura 10 ilustra o resultado obtido para o pavimento bloco vazado.

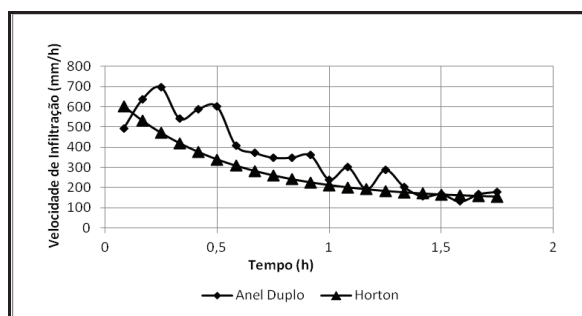


Figura 10 - Resultados do infiltrômetro de anéis concêntricos e a Equação de Horton, para o asfalto poroso

Observa-se (Figuras 7 e 9) que a VIB no asfalto poroso foi menor em relação ao bloco vazado, sendo a VIB inicial para o asfalto poroso de 250 mm/h e do bloco vazado de 600 mm/h. Provavelmente a presença das aberturas e das juntas do bloco vazado, promoveu uma maior infiltração da água no revestimento.

Com os resultados dos teste do infiltrômetro de anéis concêntricos ficou evidente a redução da capacidade de infiltração do asfalto poroso, de 3,28mm/h em comparação ao bloco vazado de 199,93 mm/h, sendo uma diferença percentual de 98,35 %.

CONCLUSÃO

O presente trabalho descreve um estudo experimental de pavimentos permeáveis que visa à mitigação do escoamento superficial urbano e controle da qualidade das águas pluviais. O experimento consiste em dois módulos de pavimentos permeáveis, com diferentes tipos de revestimento (blocos vazados e asfalto poroso).

Comparados com estudos anteriores no mesmo dispositivo, os dados indicam que os dois pavimentos permeáveis estudados somente o de revestimento de blocos vazados continua fazendo o controle adequado do volume de escoamento

superficial, mesmo com a perda da capacidade de infiltração este ainda apresenta características de um pavimento permeável.

Foi observado um grande comprometimento da capacidade de infiltração no revestimento asfáltico. Os valores de coeficiente de escoamento superficial encontrados na segunda etapa, realizado por Castro (2013), demonstram um aumento de até 4,55 vezes em relação ao primeiro ano de uso do pavimento. Isso indica uma obstrução da camada superficial que impede a infiltração da água, sugerindo a necessidade de manutenções periódicas para se conservar as características de porosidade do revestimento, bem como a prevenção de depósito de matéria granular ou mesmo depósito de sedimentos.

Evidenciou-se que o asfalto poroso no módulo experimental é o menos resistente em relação ao uso, com o passar dos anos, diferenciando-se do bloco vazado, que ainda apresentou uma infiltração superior a do asfalto poroso, em torno de 44,06%, pelo teste da Norma ASTM, e uma diferença de 98,35% o valor obtido pelo Infiltrômetro dos anéis concêntricos.

A redução da capacidade de infiltração adveio pela falta de manutenção dos pavimentos, estabelecido no início do experimento, de modo a avaliar as condições reais de uso do pavimento. Para evitar esta impermeabilização, a manutenção destes pavimentos consiste na varrição do local, em torno de duas vezes ao ano, de modo a crescer a vida útil do pavimento.

Os resultados obtidos na pesquisa corroboram com as críticas de que o controle na fonte tem uma fragilidade ainda não solucionada no âmbito da gestão da drenagem urbana no Brasil, que é verificar ao longo do tempo se os dispositivos estão de fato controlando a geração de escoamento pluvial conforme o que foi estimado no projeto.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, L. A. *Estudo Experimental de Pavimentos Permeáveis Para o Controle do Escoamento Superficial na Fonte*. 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. *RBRH: revista brasileira dos recursos hídricos*, v. 5, n. 3, p. 21-29, jul./set. 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C1701: Standard Test Methods for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete*. [S.l.]: ASTM, 2009.

BEAN, E. Z.; HUNT, W. F.; BIDELESPACH, D. A.; SMITH, J. T. *Study on the surface infiltration rate of permeable pavements*. Washington, DC: Interlocking Concrete Pavement Institute, 2004.

BEELDENS, A.; GENDERA, F.; RENS, L.; VAN DEN BERGHE, T.; VAN DEN HEYNING, G.; VIJVERMAN, L. *Revêtements drainants en pavés de béton*. Bruxelles: Centre de Recherches Routières, 2008. Annexe au Bulletin CRR n° 77, v.

5 - Trimestriel: outubro/novembre /décembre.

CANHOLI, A. P. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Editora Oficinas de Textos, 2005.

CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A.; DA SILVEIRA, A. L. L.; MARQUES, D. M. M. Avaliação da Evolução do Comportamento Quantitativo de Pavimentos Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v 18, n. 1, p. 263-273, jan./mar. 2013.

FASSMAN, E. A.; BLACKBOURN, S. Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System over Impermeable Soils. *J. Hydrol. Eng.*, v. 15, n. 6, p. 475-485, 2010.

GONÇALVES, M.; POLIDORO, M.; DA SILVA, D. F. Análise dos índices de impermeabilização do solo utilizando geoprocessamento: proposta de atualização do decreto n.º. 402/1980 para projetos de drenagem no município de Londrina-PR. In: SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, SERVIÇOS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE, 2., 2009, Taubaté, SP. *Anais...* São Paulo: IPABHI, 2009. p. 569-576.

JABUR, A. S. *Relatório Final de Pesquisa de Pós- Doutorado*. 44 f. (Pós-Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, no Instituto de Pesquisas Hidráulicas)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

JABUR, A. S.; DORNELLES, F. ; SILVEIRA, A. L. L. Da; GOLDENFUM, J. A.; CARDOSO, A.; OKAWA, C. M. P. *Avaliação de pavimentos permeáveis com o uso da norma ASTM C1701*. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, RS, 2013.

LUCKE, T.; BEECHAM, S. *An investigation into long-term infiltration rates for permeable pavements on sloping sub-catchments*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, 12., 2011, Porto Alegre, RS. *Proceedings...* Venue: Porto Alegre, 2011. p. 11-16.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. *Irrigação: princípios e métodos*. 2. ed. atual. e ampl. Viçosa, Minas Gerais: Editora UFV, 2009.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. *Pavimento Intertravado Permeável: melhores práticas*. São Paulo: Editora Associação Brasileira de Cimento Portland, 2011.

MCNALLY, C.; DEPROSPO, L. P.; JOUBERT, L. Permeable Pavement: *What's it Doing on My Street?*. Island: The University of Rhode Island Cooperative Extension, Rhode Island Department of Health, Source Water Protection Program, 2007. Adapted by the California Coastal Commission, March 2007.

PINTO, L. L. C. A. *O desempenho dos pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano*. 2011. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SANSALONE, J.; KUANG, X.; YING, G.; RANIERI, V. Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage. *Water Res.*, v. 46, n. 20, p. 673-674, Dec. 2012.

SMITH, D. R. *Permeable Interlocking Concrete Pavement: selection, design, construction and maintenance*. 3. ed. Canada: Interlocking Concrete Pavement Institute, 2006.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia aplicada*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH GWP, 2005. v. 1.

VIEIRA, G. R. S.; SILVA, C. O. (Coord.). *Manual de pavimento intertravado: passeio público*. São Paulo: Editora Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, 2010.

YONG, C. F.; MCCARTHY, D. T.; DELETIC, A. Predicting physical clogging of porous and permeable pavements. *J. Hydrol.*, v. 481, p. 48-55, Feb. 2013.

Colaboração dos autores

Andrea Sartori Jabur: Realizou a pesquisa no pós-doutorado, com o levantamento bibliográfico, o levantamento metodológico, o levantamento de dados no trabalho de campo, interpretação dos resultados e fechamento do texto.

Fernando Dornelles: Orientação da pesquisa, levantamento de dados, interpretação dos resultados e fechamento da escrita.

André Silveira: Auxiliou na orientação da pesquisa, no levantamento metodológico e na interpretação dos dados finais.

Joel Goldenfum: Auxiliou na orientação da pesquisa, no levantamento metodológico e na interpretação dos dados finais.

Cristiane Michiko Okawa Passos: Auxílio no levantamento bibliográfico da pesquisa, na escrita do texto, na interpretação dos dados, na correção final e no fechamento do artigo.

Romulo Ruiz Gasparini: Auxílio na coleta de dados, com a obtenção de equipamentos, no auxílio na metodologia estatística da pesquisa, na escrita e na correção do artigo final.