



Drenagem Urbana Sustentável: Parâmetros

Elias Riffel¹, Felipe Dorr¹, Arnoldo Wesley Imhof¹

¹Departamento de Engenharia Civil - Centro Universitário de Brusque (UNIFEBE)
Brusque - SC - Brasil

(eliasriffel, felipe.dor, arnoldo)@unifebe.edu.br

Resumo. A utilização do pavimento drenante tem se mostrado uma solução eficaz para mitigar os problemas de escoamento superficial em áreas urbanas, prevenindo alagamentos e melhorando o sistema urbano de drenagem. Nesse contexto, foi elaborada uma pesquisa com o objetivo de dimensionar a base granular de um sistema de pavimentação permeável para tráfego de pedestres. A metodologia foi delineada por uma pesquisa experimental para solução da questão problema em verificar qual a altura da camada granular necessária à percolação da água pluvial. Nos resultados da verificação dos parâmetros hidráulico e mecânico de dimensionamento do sistema, foi determinado a altura da base granular $hb = 19,13$ cm.

Abstract. The use of drainage pavement has proven to be an effective solution to mitigate surface runoff problems in urban areas, preventing flooding and improving the urban drainage system. In this context, research was carried out with the objective of dimensioning the granular base of a permeable paving system for pedestrian traffic. The methodology was designed by experimental research to solve the problem of verifying the height of the granular layer necessary for the percolation of rainwater. Based on the results of checking the hydraulic and mechanical system sizing parameters, the height of the granular base $hb = 19.13$ cm was determined.

1. Introdução

No início do século passado, apenas 10% da população mundial estava concentrada em zonas urbanas residenciais, contudo, o crescimento vertiginoso das metrópoles por meio da migração das zonas rurais, acelerou o processo de urbanização em níveis extraordinários, fazendo com que no ano de 2007, pela primeira vez em termos globais, a população urbana superasse a população rural, e segundo dados demográficos, poderá atingir mais de 70% até o ano de 2050 (GIUDICE; MENDES, 2013).

A ocupação urbana, de forma intrínseca, é altamente modificadora do ambiente natural e afeta de forma demasiada as propriedades dos solos, com especial modificação dos processos superficiais, iniciando-se pelo desmatamento e posterior impermeabilização do solo, causando com frequência, problemas de erosão, assoreamento e inundações (PEJON; RODRIGUES; ZUQUETE, 2013).

De acordo com os autores Marchioni e Silva (2011), o uso de pavimentos drenantes é uma alternativa eficiente para minimizar problemas causados pela impermeabilização do solo nas áreas urbanas, como inundações, erosões e comprometimento da qualidade da água. Além disso, esses pavimentos contribuem para a melhoria do microclima e da paisagem urbana, permitindo a infiltração da água da

chuva no solo e o seu reuso para fins não potáveis, como irrigação de jardins e lavagem de ruas.

O pavimento permeável é caracterizado por possuir drenabilidade e elevada porosidade, deixando-se infiltrar a água através de sua estrutura porosa e, quando corretamente projetado e implantado, influencia de forma significativa as vazões de pico que ocorrem durante os eventos pluviais (BATEZINI, 2013).

A norma NBR 16416 (2015) estabelece que o pavimento permeável deve atender, de forma simultânea, as solicitações de esforços mecânicos e condições de rolamento, sendo que a estrutura deva permitir a percolação e/ou o acúmulo temporário de água, diminuindo o escoamento superficial, sem causar danos a sua estrutura. A estrutura permeável é composta por um revestimento permeável, camada de assentamento e uma base de granulometria aberta, com predominância de um mesmo tipo de agregado, com pequena quantidade de finos ou que não contém finos, com índice de vazios, segundo Balbo (2020), mínimo de 32%.

Os pavimentos permeáveis evitam o escoamento superficial, segundo Marchioni, Silva e Mayor (2011), assegurando que, praticamente 100% da água seja infiltrada no solo ou então seja transportada através de sistemas auxiliares de drenagem, conforme mostrado na figura 1.

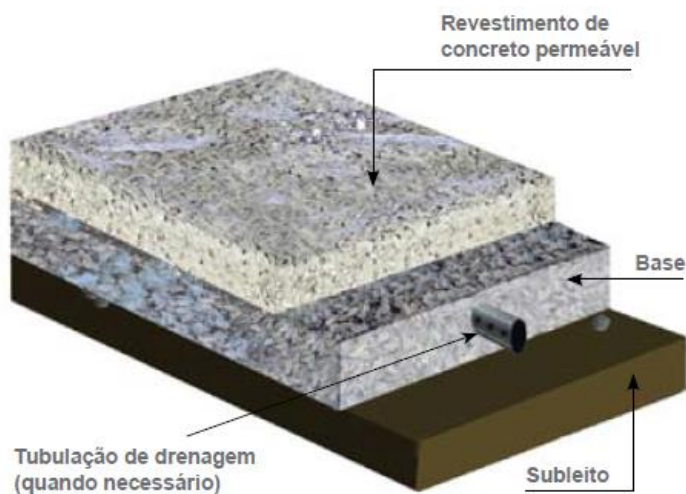


Figura 1. Seção típica do pavimento permeável

Analisando o contexto apresentado, indaga-se a seguinte questão problema: qual o valor da altura da base granular (h_b) da seção tipo do sistema urbano de pavimentação drenante, considerando a precipitação da chuva de projeto para o contexto local? A partir desta questão, foram traçados o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa. O objetivo geral visa em determinar a altura da base e/ou sub-base do sistema drenante, constituído por material granular composto de brita 1. A partir do objetivo geral, foram delineados dois objetivos específicos: de estabelecer os parâmetros de referência normativa para os dimensionamentos hidráulico e mecânico do pavimento drenante em vias urbanas destinadas à circulação de pedestres e de desenvolver um simulador conforme as dimensões e características a serem definidas com o dimensionamento das camadas granulares do pavimento drenante.



A metodologia do estudo apresentou abordagem de natureza aplicada à construção civil e foi delimitada por uma pesquisa bibliográfica para apresentação dos conceitos inerentes à pavimentação permeável de concreto, além de uma pesquisa experimental, para montagem de um tanque de vidro temperado incolor de espessura 10 mm, denominado de simulador. O simulador foi concebido a partir dos resultados da pesquisa, e tem a função de verificar a eficiência do sistema drenante, que será analisado em etapa complementar deste estudo.

2. Fundamentação teórica

2.1. Impacto na infraestrutura urbana

A partir da segunda metade do século XX, a massiva concentração da população em áreas urbanas foi manifestada como um fenômeno mundial, inclusive no Brasil, constatando-se considerável fluxo do campo em direção às cidades, agravando os problemas de infraestrutura urbana e causando forte impacto no saneamento básico, aí incluída a drenagem urbana (Costa, Siqueira e Menezes Filho, 2007) e os efeitos desse processo podem ser percebidos sobre todo o aparelhamento urbano relativo aos recursos hídricos, como abastecimento de água, transporte e tratamento de esgoto e drenagem pluvial (TUCCI, 2015).

Segundo a autora Tominaga (2015), o Brasil encontra-se entre os países do mundo mais atingidos por inundações e enchentes, com registro de 94 desastres cadastrados no período de 1960 a 2008, com 5.720 mortes e mais de 15 milhões de pessoas afetadas entre desabrigados e desalojados. De acordo com Amaral e Ribeiro (2015), as planícies e vales apresentam lento escoamento superficial das águas das chuvas, e nas áreas urbanas estes fenômenos têm sido intensificados por ações antrópicas, como impermeabilização superficial, assoreamento e retificação de cursos d'água. Neste modelo de urbanização, frisam os mesmos autores, o uso do espaço afronta a natureza, que, mesmo em cidades de topografia relativamente plana, os resultados são catastróficos.

Um dos principais impactos que o desenvolvimento urbano provoca nos processos hidrológicos estão relacionados ao crescimento das superfícies impermeáveis, e juntamente com a ocupação indevida das margens ribeirinhas, aumentam a ocorrência de picos de cheias, agravando os problemas de enchentes dos rios e inundações das cidades (Batezini e Balbo, 2015), além de outros impactos, como obstrução do escoamento, deterioração da qualidade da água, produção de sedimentos e aumento das vazões médias de cheia em até 7 vezes (TUCCI; BRAGA, 2015)

Rodrigues e Menciondo (2013) citam que, o ciclo hidrológico é um fenômeno dinâmico, complexo e global, simplificado através dos componentes de armazenamento e de fluxo. O ciclo hidrológico constitui um conjunto de processos físicos que envolve circulação e movimentação da água na superfície terrestre e na atmosfera.

O aumento da velocidade e do volume dos deflúvios a jusante não apenas causa elevação no nível de rios e reservatórios, como também gera erosão e transporte de solos, assim como arraste de outros materiais e detritos presentes no meio urbano (BALBO, 2020).

Atualmente, em casos específicos, em vez de pavimentos serem construídos com materiais para ser impermeáveis, é recomendável o emprego do pavimento poroso, que



deixa a chuva se infiltrar, em vez de escoar. Os pavimentos permeáveis são recomendados para a execução de estacionamentos e vias urbanas com tráfego leve e de baixa intensidade (SUZUKI, AZEVEDO e KABBACH JÚNIOR, 2013).

2.2 Sistemas de drenagem urbana sustentável (SDUS)

De acordo com Souza, Abreu e Ribeiro (2019), o crescimento acelerado da população urbana em cidades de países em desenvolvimento, destaca-se aqui o Brasil, acompanhado pela falta de um planejamento urbano mais eficiente, vem acarretando impactos ambientais, sociais e econômicos, considerados como o tripé da sustentabilidade, e interferem diretamente no cotidiano da população.

Os sistemas de drenagem sustentável são projetados para funcionar em pequenas unidades disseminadas pelo terreno de forma a manter as condições hidrológicas mais próximas possível da condição anterior à ocupação Canholi (2014), cuja concepção expressa por Ballard *et al* (2007) pontuam afirmações como:

- ¹ reduzir as taxas de escoamento e os riscos de inundações à jusante;
- ² reduzir os volumes adicionais resultantes da urbanização;
- ³ possibilitar a recarga natural das águas subterrâneas;
- ⁴ reduzir as concentrações de poluentes das águas subterrâneas;
- ⁵ reduzir a descarga e a concentração de água poluída em cursos d'água;
- ⁶ agir como tampão para derramamentos acidentais;
- ⁷ contribuir com oportunidades de *habitats* para a biodiversidade das áreas desenvolvidas e valorização dos centros urbanos.

Becker e Pinheiro (2019) vem corroborar afirmando que, os pavimentos permeáveis permitem a retenção de poluentes, proporcionando a purificação biológica, química e física da água, como também Tennis, Leming e Akers (2008) apresentam dois estudos que demonstram a remoção de poluentes a longo prazo em pavimentos permeáveis, com índices expressivos de 82% e 95%. Batezini (2019) e Balbo (2020) evidenciam outro benefício ambiental referente ao pavimento drenante, relacionado ao efeito *Urban Heat Island (UHI)* na mitigação das ilhas de calor urbano, devido a maior taxa de refletância (maior albedo) de energia solar em relação aos pavimentos convencionais; já que a urbanização produz mais absorção de luz solar e retenção de calor em relação à zona não urbanizada que as circunda (FERREIRA, 2019).

Fresno *et al.* (2005) argumentam que a boa prática na drenagem urbana sustentável é a redução do escoamento superficial, minimizando as superfícies impermeáveis e dividindo as bacias para evitar a concentração de grandes volumes em um ponto. Os mesmos autores ainda descrevem alguns dos principais sistemas urbanos estruturais:

- superfícies permeáveis: que permitem a infiltração da água, como pavimentos intertravados de concreto poroso, além de placas de revestimento, assim indicadas na figura 2.



Figura 2. Revestimento com placas em concreto poroso

- poços e trincheiras de infiltração: são perfurações com material granular para armazenamento e coleta da água até a infiltração no terreno natural;
- depósitos de infiltração: são reservatórios de superfície rasa onde a água é armazenada até a percolação;
- drenos filtrantes: são trincheiras cobertas com geotêxtil e preenchidas com cascalho, dentro das quais circula o escoamento das superfícies de drenagem;
- lagoas de retenção: são depressões no solo que contêm um volume de água constante, e tem as funções de esconder bancos de sedimentos e remover metais pesados, coliformes e matéria orgânica.

Os SUDS têm a dupla função de reduzir os riscos relacionados ao impacto das águas e promover a integração paisagística, tratando de resolver o problema das inundações como propiciar um urbanismo mais sustentável e resiliente, ademais, a principal característica dos SUDS reside na infiltração por meio da maximização da captação dos deflúvios das águas da chuva na origem, reduzindo o escoamento superficial e também preservando a qualidade da água (FERREIRA, 2019).

3. Procedimentos Metodológicos

3.1. Classificação de pesquisa

O delineamento da pesquisa foi organizado com embasamento de 4 eixos tipológicos: considerando a natureza da pesquisa, de acordo com a abordagem, quanto aos objetivos e em relação aos procedimentos técnicos.

Em relação a sua natureza, a pesquisa foi definida como aplicada, uma vez que o campo de ações foi destinado especificamente ao setor da indústria da construção civil. De acordo com a abordagem, a pesquisa foi correlacionada como uma combinação de métodos qualitativos e quantitativos: qualitativos em função do volume teórico conceitual que envolve as definições do campo de estudo e, também quantitativos, em função da expressão numérica das variáveis analisadas no estudo, não se sobrepondo aqui a predominância de um método sobre o outro.

Quanto aos três grupos de objetivos, a pesquisa foi definida como exploratória, uma vez que no estudo não há construção de hipóteses. Em relação aos procedimentos técnicos para a coleta de dados, foram associados uma pesquisa bibliográfica para o



referenciamento teórico do conjunto conceitual, além de uma pesquisa experimental que, a partir das informações equacionadas, permitiram a construção do reservatório, neste estudo denominado de simulador.

3.2. População e amostra

De acordo com Gil (2016), universo ou população é um conjunto definido de elementos que possuem determinadas características, enquanto que a amostra é representada através de um subconjunto por meio do qual se estabelecem e se estimam as características desse universo ou população. A partir da perspectiva do autor, a população definida no estudo foi representada pelos pavimentos drenantes, considerando suas diversas tipologias de revestimento, e como amostra da pesquisa, foi referenciado o revestimento de peças de concreto permeável, definido como paver, e utilizado como elemento para a camada de revestimento do simulador.

3.3. Metodologia do dimensionamento

No processo de elaboração do projeto do simulador, foram levados em consideração os requisitos estratégicos estabelecidos pelo Plano Diretor da cidade de Brusque/SC, conforme Lei Complementar nº 135/08, de 28 de dezembro de 2008, especificamente em relação à construção de calçadas nas vias municipais. Esses requisitos foram analisados para determinar as diretrizes adequadas a serem seguidas. De acordo com as diretrizes do Plano Diretor, definiu-se um gabarito padrão de 2 metros para a largura do passeio. Essa medida é aplicada em vias coletoras e locais, levando em consideração as necessidades dos pedestres e a integração urbana (BRUSQUE, 2008).

O dimensionamento do pavimento permeável é uma etapa essencial para garantir sua eficiência e durabilidade. Para realizar esse dimensionamento, a principal referência utilizada foi a NBR 16416 (2015), que estabelece diretrizes e critérios para o projeto e a execução de pavimentos permeáveis de concreto. De forma complementar, foi consultado também o artigo da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) dos autores Marchioni e Silva (2011). Em relação à definição do índice pluviométrico (P) analisou-se dois referenciais: a curva de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) para o contexto da cidade de Brusque/SC, através do Atlas Pluviométrico do Brasil editado pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), além do *software* HidroChuSC 2.0, referenciado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI)

3.3. Equação do dimensionamento

A NBR 16416 (2015) recomenda a utilização do dimensionamento detalhado tendo em vista as condições locais do solo e precipitação, e estabelece que o dimensionamento da altura da base granular refere-se exclusivamente à função de reservatório de água do pavimento permeável, não excluindo a necessidade do dimensionamento mecânico conforme o tipo de pavimento escolhido, devendo-se adotar o maior valor que atenda simultaneamente aos requisitos hidráulico e mecânico.

No método proposto por Marchioni e Silva (2011), determina-se a altura mínima da base granular (h_b) necessária para armazenar a diferença entre o volume de água precipitada e o volume de água infiltrada pelo solo. Essa diferença é conhecida como volume de água armazenada ou volume de armazenamento. A base granular deve ter



altura suficiente para armazenar esse volume, garantindo que o sistema de pavimentação permeável possa absorver a água de forma eficiente e evitar acúmulos na superfície. Para obter o valor de hb é utilizada a equação 1, que relaciona os parâmetros necessários para calcular esta altura. A mesma equação também é apresentada pela NBR 16416 (2015).

$$hb = (P \times R + P - f \times T) \div Vr \text{ (equação 1)}$$

O cálculo da profundidade mínima da camada de base granular (hb) é determinado pelas seguintes variáveis físicas cujos termos e definições estão estabelecidas conforme tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para profundidade mínima

Termos	Definições
P	Precipitação da chuva de projeto (m)
R	Relação entre a área de contribuição (m^2) e a área permeável (m^2); (Ac/Ap)
f	Coeficiente de permeabilidade do solo (m/h)
T	Tempo de enchimento do reservatório (h)
Vr	Índice de vazios da camada ou porosidade do agregado

São necessárias duas verificações para validação da altura da base granular: o nível do lençol freático e a altura máxima (hm_{\max}) da base permitida, com as seguintes proposições:

Verificação 1: Distância do lençol freático até a parte inferior do pavimento ≥ 60 cm;

Verificação 2: Base granular (hb) < altura máxima da base (hm_{\max}).

Para determinar o valor de hm_{\max} , deve-se utilizar a equação 02.

$$hm_{\max} = (f \times Ts) \div Vr \text{ (equação 2)}$$

A verificação, de acordo com Marchioni e Silva (2011), tem como objetivo evitar que a água permaneça na base maior que o tempo máximo de armazenamento de água (T_s) de 72 h. Os mesmos autores orientam ainda que, deve ser considerado o pior caso entre as duas verificações, e caso forem validadas, o valor da base granular hb é adotado como espessura da camada granular do pavimento. Caso o valor de hm_{\max} seja inferior ao hb , é necessário que o sistema seja complementado com tubulação de drenagem para o manejo do excesso de água, sendo assim utilizado um sistema de infiltração parcial ou sem infiltração.

Nos sistemas de infiltração parcial ou sem infiltração no solo com saída por exutórios, Suzuki, Azevedo e Kabbach Junior (2013) propõem que a água armazenada no reservatório seja reutilizada para fins não potáveis, em vez de ser simplesmente lançada para a rede de drenagem, conforme representado na figura 3.



Figura 3. Pavimento com reservatório estrutural

4. Análise dos Resultados

4.1. Pré-dimensionamento hidráulico

O dimensionamento hidráulico é voltado para a capacidade do pavimento em armazenar e drenar a água de forma eficiente. Nesse dimensionamento, são considerados fatores como a intensidade de chuva na região, o tempo de retorno das chuvas e o volume de água a ser infiltrado e/ou armazenado pelo pavimento permeável. O objetivo é evitar acúmulos de água na superfície do pavimento, prevenindo problemas de drenagem e garantindo a funcionalidade do sistema.

No método proposto por Marchioni e Silva (2011), determina-se a altura mínima da base granular (h_b) necessária para armazenar a diferença entre o volume de água precipitada e o volume de água infiltrada pelo solo. Essa diferença é conhecida como volume de água armazenada ou volume de armazenamento. A base granular deve ter altura suficiente para armazenar esse volume, garantindo que o sistema de pavimentação permeável possa absorver a água de forma eficiente e evitar acúmulos na superfície. Para obter o valor de h_b foi utilizado a equação 1, que associa os parâmetros para cada uma das variáveis assim descritas:

P = estabelecida como altura da chuva de projeto e medida em metros (m), foi determinada através do programa HidroChuSC 2.0, aplicado para estimativa de chuvas intensas e chuvas de projeto para o estado de Santa Catarina disponibilizado pela EPAGRI. A versão 2.0 do *software* é um programa de computador atualizado para dimensionamento de sistemas para drenagem superficial. A partir dos mesmos parâmetros adotados para as curvas IDF, o registro gráfico do hietograma indicou o valor de 53,5 mm, conforme indicado na figura 4.

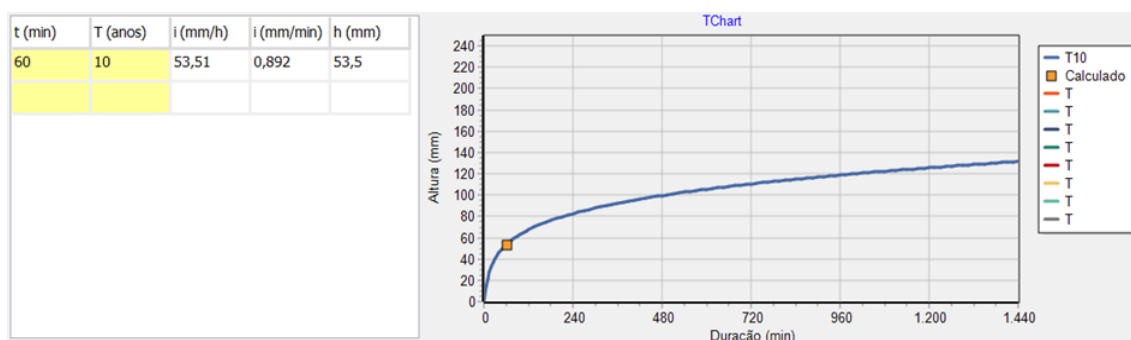


Figura 4. Hietograma da chuva de projeto

Na pesquisa também foi analisada a precipitação de projeto P por por meio das equações IDF para o município de Brusque /SC e regiões circunvizinhas. A figura 5 mostra as curvas ajustadas através das relações entre alturas de chuvas de diferentes durações.

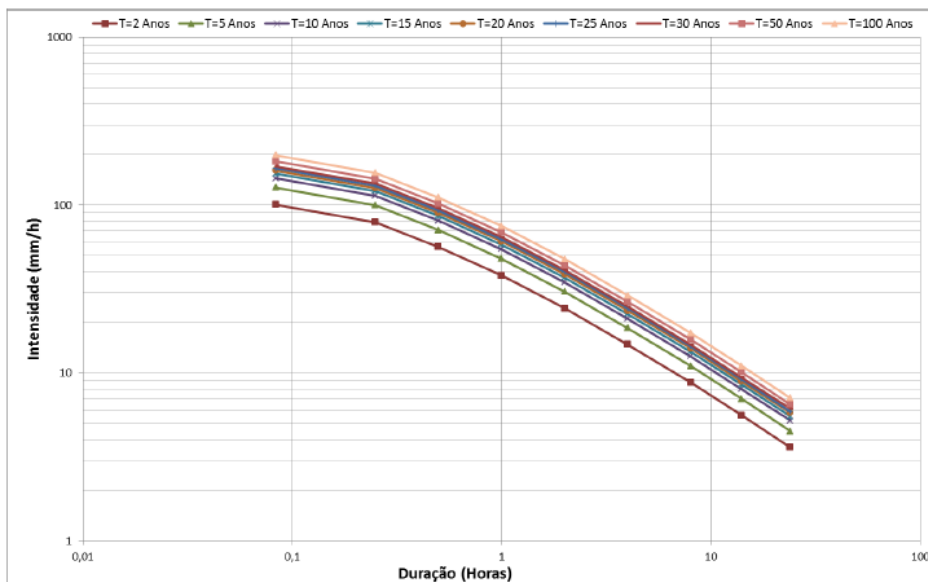


Figura 5. Curvas IDF Brusque, código ANA 02748000

As equações são válidas para tempos de retorno até 100 anos e duração de 5 minutos até 24 horas. No cálculo da precipitação foi considerando o período mínimo de retorno de 10 anos e tempo mínimo de duração de 1 h. O valor da precipitação foi estimado em 53,9 mm de acordo com a tabela 2.

Tabela 2. Altura de chuvas em mm

Duração da Chuva	Tempo de Retorno, T (anos)												
	2	5	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90	100
5 Minutos	8,7	10,6	12,0	12,8	13,4	13,8	14,2	14,8	15,2	15,6	16,0	16,4	16,6
10 Minutos	15,5	18,8	21,3	22,8	23,9	24,7	25,3	26,4	27,2	27,8	28,6	29,3	29,7
15 Minutos	20,2	24,6	27,9	29,8	31,1	32,2	33,1	34,4	35,5	36,3	37,4	38,3	38,8
20 Minutos	23,9	29,0	32,9	35,1	36,7	38,0	39,0	40,6	41,8	42,9	44,1	45,1	45,7
30 Minutos	29,3	35,6	40,3	43,1	45,1	46,6	47,9	49,8	51,4	52,6	54,1	55,4	56,1
45 Minutos	35,0	42,5	48,2	51,5	53,9	55,7	57,2	59,5	61,4	62,9	64,7	66,2	67,1
1 HORA	39,1	47,6	53,9	57,6	60,3	62,3	64,0	66,6	68,7	70,4	72,4	74,1	75,1
2 HORAS	50,0	60,7	68,8	73,6	76,9	79,6	81,7	85,1	87,7	89,8	92,4	94,6	95,8
3 HORAS	56,3	68,4	77,6	82,9	86,7	89,7	92,1	95,9	98,8	101,2	104,2	106,6	108,0
4 HORAS	60,8	73,9	83,8	89,6	93,7	96,9	99,5	103,6	106,7	109,3	112,5	115,1	116,6
5 HORAS	64,3	78,2	88,6	94,7	99,1	102,4	105,2	109,5	112,9	115,7	119,0	121,8	123,4
6 HORAS	67,2	81,7	92,6	99,0	103,5	107,0	109,9	114,4	117,9	120,8	124,3	127,2	128,9
7 HORAS	69,6	84,6	95,9	102,6	107,2	110,9	113,9	118,6	122,2	125,2	128,8	131,8	133,5
8 HORAS	71,8	87,2	98,8	105,7	110,5	114,2	117,3	122,2	125,9	129,0	132,7	135,8	137,6
12 HORAS	78,2	94,9	107,6	115,1	120,4	124,4	127,8	133,1	137,1	140,5	144,6	147,9	149,8
14 HORAS	80,6	97,9	111,0	118,7	124,1	128,3	131,8	137,2	141,4	144,9	149,1	152,5	154,5
20 HORAS	86,2	104,8	118,8	127,0	132,8	137,3	141,0	146,8	151,3	155,0	159,5	163,2	165,3
24 HORAS	89,1	108,3	122,7	131,2	137,2	141,9	145,7	151,7	156,4	160,2	164,8	168,7	170,9

Após comparar os resultados obtidos entre as referências da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2013) e o EPAGRI (2023), foi constatada a proximidade entre os valores encontrados e, levando-se em consideração essa análise, foi adotado o valor apresentado de 53,9 mm, por representar o maior valor para a chuva de projeto.

R = relação entre a área de contribuição (A_c), definida como área total, e a área permeável (A_p). A área de contribuição do simulador, que representou a amostra da pesquisa, foi determinada a partir das dimensões superficiais de 40 cm x 2,00 m, para $A_c = 0,80 \text{ m}^2$. A área permeável tem medidas de 40 cm x 40 cm, com $A_p = 0,16 \text{ m}^2$. O quociente entre os valores determinou em $R = 5$. A paginação das duas áreas, impermeável e permeável, estão representadas na figura 6.

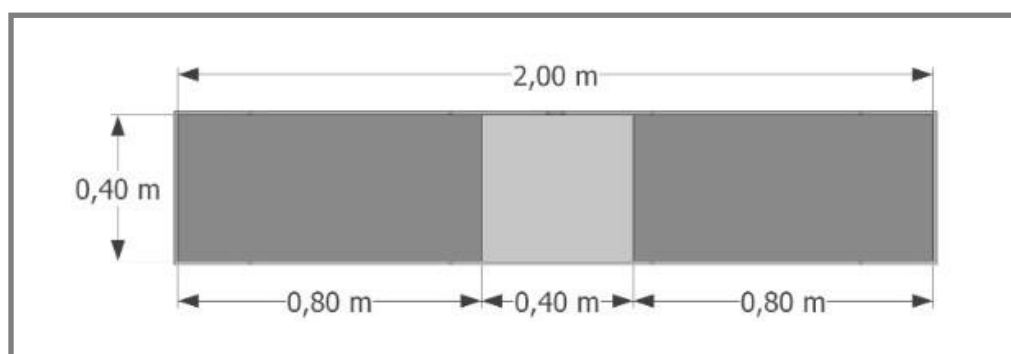


Figura 6. Paginação e dimensões superficiais do simulador

f = coeficiente de permeabilidade do solo medido em metros/hora (m/h). No estudo foi adotado o valor para areias finas, de 1.10^{-5} m/s ou 3600.10^{-5} m/h . Os valores típicos dos coeficientes de permeabilidade estão representados na figura 7.

Argilas	$< 10^{-9} \text{ m/s}$
Siltos	$10^{-6} \text{ a } 10^{-9} \text{ m/s}$
Areias argilosas	10^{-7} m/s
Areias finas	10^{-5} m/s
Areias médias	10^{-4} m/s
Areias grossas	10^{-3} m/s

Figura 7. Coeficiente de infiltração

T = tempo efetivo de enchimento da camada reservatório expresso em horas, ou seja, o tempo que leva para o reservatório ficar saturado na ocorrência da chuva de projeto. Recomenda-se adotar 2 h para este parâmetro.

V_r = índice de vazios da camada permeável. O índice de vazios ou porosidade foi determinado conforme definido pela NBR 16972 (2021), considerando a densidade da água, a densidade média do agregado e a densidade do agregado seco, correlacionado à NBR 16917 (2021). O agregado graúdo utilizado como material drenante foi a brita



graduada 1, com índice de vazios $V_r = 37,629\%$, valor válido e maior que o mínimo de 32%, conforme NBR 16416 (2011). O memorial de cálculo para dedução do índice V_r não foi apresentado, uma vez que não se constitui escopo da pesquisa.

Assim, de acordo com os parâmetros adotados para o dimensionamento hidráulico do pavimento, foram definidos através das equações 1 e 2, os valores de $h_b = 66,81 \text{ cm}$ e $h_{m\acute{a}x} = 19,13 \text{ cm}$, respectivamente; contudo, não aplicando-se o preceito de que $h_b < h_{m\acute{a}x}$, deve ser adotado um sistema complementar com tubulação de drenagem sem infiltração, para manejo do excesso de água. O tubo extravasor para atendimento à vazão da chuva de projeto do simulador, foi calculado com diâmetro de 34,3 mm, também não demonstrado aqui, por não representar escopo da pesquisa.

4.2. Pré-dimensionamento mecânico

O dimensionamento mecânico está relacionado à capacidade do pavimento em suportar as cargas impostas sobre ele, como o tráfego de veículos e pedestres. Nesse dimensionamento, são considerados fatores como o tipo de solo, a espessura das camadas de base e sub-base, e a resistência dos materiais utilizados. O objetivo é garantir a estabilidade e a durabilidade do pavimento frente às cargas aplicadas.

De acordo com Marchioni e Silva (2011), para pavimentos destinados exclusivamente ao tráfego de pedestres, é recomendada uma espessura mínima de 150 mm. Este valor será adotado como referência para o dimensionamento do projeto do pavimento. Ainda, segundo os mesmos autores, a camada de base tem dimensão fixa de 100 mm e a camada de sub-base terá como dimensão a diferença para atingir o valor total dimensionado.

4.3. Pré-dimensionamento mecânico

Para determinar a altura do pavimento foi necessário levar em consideração todas as camadas da estrutura do pavimento permeável. O pré-dimensionamento mecânico estabeleceu uma altura mínima de 150 mm para de base, todavia, ao realizar o pré-dimensionamento hidráulico, obteve-se um valor superior, adotando-se como espessura da camada de base e sub-base o maior valor entre os dois dimensionamentos, desta forma, de 191,3 mm para a altura da base granular. Com base nesses parâmetros, a altura total do pavimento foi definida a partir das espessuras de cada uma das camadas componentes, conforme detalhado na tabela 3.

Tabela 3. Altura do pavimento drenante

Camada do pavimento	Espessura da camada (mm)
Paver drenante	60
Assentamento	50
Base granular	100
Sub-base granular	91,3
Total	301,3

A partir da definição das alturas, foi construído um reservatório simulador em escala real de uma via para acesso de pedestres, conforme padrão proposto pela

legislação do plano diretor urbano do município. O simulador foi construído em vidro temperado incolor espessura 10 mm e seções de 40 cm de profundidade x 50 cm de altura x 2.00 m de largura, conforme a figura 8.



Figura 8. Vista frontal do reservatório

5. Considerações Finais

O crescimento da população urbana tem apresentado índices acelerados de ocupação no Brasil, caracterizado por uma expansão irregular nas periferias das cidades, sem aderência às regulamentações dos planos diretores municipais. O aumento das áreas impermeabilizadas em função da urbanização, iniciou próximo às várzeas dos rios em direção a morros e colinas, em função da interação da população com esses corpos hídricos. No Brasil, em um cenário sem a ocorrência de terremotos ou *tsunamis*, importa admitir que deslizamentos de terras, inundações e alagamentos têm ocorrido de forma recorrente no país.

É mister salientar aqui a compreensão entre os dois conceitos: enquanto nas inundações ocorre a submersão das áreas fora dos limites normais do curso d' água, geralmente causada por chuvas distribuídas e alto volume acumulado pela bacia de contribuição, nos alagamentos verifica-se a extrapolação da capacidade de escoamento dos sistemas pluviais de drenagem, e o subsequente acúmulo de água em calçadas, em ruas e demais infraestruturas urbanas.

A pavimentação permeável constitui-se como uma tecnologia essencial de drenagem sustentável, ao proporcionar a retenção do escoamento superficial por meio da infiltração dos volumes precipitados pelo revestimento poroso que compõe a camada superior do pavimento drenante, mitigando desta forma a pressão sobre os equipamentos urbanos de drenagem, como sarjetas, bocas de lobo e tubulações, além de promover a purificação da carga poluente contida nos deflúvios pluviais que atingem os corpos d' água.

Neste contexto, foi determinada a altura da base granular (h_b) que compõe a estrutura-reservatório do pavimento e, como resposta à questão problema definida na pesquisa, avaliando os dimensionamentos hidráulico e mecânico da camada de base, calculou-se o valor de $h_b = 191,30$ mm, que atendeu aos parâmetros normativos como



também às condições locais de precipitação. A partir da construção do simulador, estudos futuros poderão ser elaborados com o objetivo de analisar a eficiência drenante do pavimento, com a implantação de um sistema hidráulico para simulação da chuva de projeto, à luz dos parâmetros já definidos nesta análise.

A pesquisa visa agregar informações tanto para a comunidade acadêmica como para o campo de ação da governança pública, uma vez que a gestão urbana para mitigação dos efeitos deletérios de inundações e alagamentos competem às esferas administrativas do Estado.

O pavimento drenante tem por concepção a função de reter o escoamento superficial através da sua estrutura porosa, e assim recuperar as condições do ciclo hidrológico natural das bacias pós-urbanização, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis e eficientes no gerenciamento das águas pluviais.

Referências

- Amaral, R. do e Ribeiro, R. R. (2015). Inundação e enchentes. In Tominaga, L. K, Santoro, J. e Amaral, R. do. Desastres naturais: conhecer para prevenir. 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 25 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 6 p.
- Atlas Pluviométrico do Brasil. (2013). Equações Intensidade-Duração-Frequência: estação pluviométrica Brusque código 02748000. Adriana B. Weschenfelder; Karine Pickbrenner e Eber José de Andrade Pinto. Porto Alegre: CPRM.
- Balbo, J. T. (2020). Pavimentos de concreto permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.
- Ballard, B. et al. (2011). The SUDS manual. London: Ciria.
- Batezini, R. (2019). Estudo das características hidráulicas e mecânicas de calçadas em concreto permeável em pista experimental. Tese (Doutorado em Ciências) - Departamento de Engenharia de Transportes - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Batezini, R. e Balbo, J. T. (2015, junho). Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, São Paulo, 8 (3), p. 248-259.
- Becker, N. e Pinheiro, I. G. (2019). Potencialidade dos pavimentos permeáveis na melhoria da qualidade da água do escoamento superficial: uma revisão. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, Curitiba, 11, p. 1-11.
- Brusque. (2008). Lei Complementar nº 135/08, de 28 de dezembro de 2008. Dispõe sobre a avaliação, revisão e atualização do plano diretor de organização físico-territorial de Brusque (SC) e sua adequação ao estatuto da cidade e dá outras providências. Brusque (SC): Prefeitura Municipal.



- Canholi, A. P. (2014). Drenagem urbana e controle de enchentes. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Costa, A. R. da, Siqueira, E. Q. e Menezes Filho, F. C. M. de. (2007). Curso básico de hidrologia urbana: nível 3. Brasília: ReCESA.
- Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - Epagri. (2021). HidroChuSC 2.0: Programa para cálculo de chuvas intensas e chuva de projeto para Santa Catarina. Versão 2.0. Disponível em: <https://docweb.epagri.sc.gov.br/pub>. Acesso em: 08 de maio de 2023.
- Ferreira, X. C. (2019). Inundações urbanas: gestão de riscos com foco na preservação de danos. Rio de Janeiro: Lumen Juris.
- Fresno, D. C. et al. (2005, maio). Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). *Interciencia, Espanha*, 30 (5), p. 255-260.
- GIL, A. C. (2016). Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas.
- Giudice, S. L. e Mendes, J. A. R. (2013). Ações antrópicas e seus impactos nos cursos de água. In: Telles, D. D'A. (org.). *Ciclo ambiental da água: da chuva à gestão*. (p. 391-413). São Paulo: Blucher.
- Marchioni, M. e Silva, C. O. (2011). Pavimento intertravado permeável: melhores práticas. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).
- Marchioni, M., Silva, C. O. e Mayor, A. V. (2011). Conceitos e Requisitos para Pavimentos de Concreto permeável. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).
- Pejon, O. J., Rodrigues, V. G. S. e Zuquete, L. V. (2013). Impactos ambientais sobre o solo. In: Calijuro, M. do C. & Cunha, D. G. F. (org.). *Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão*. (p. 317-343). Rio de Janeiro: Elsevier.
- Rodrigues, D. B. B. e Mendiondo, E. M. (2013). Bacias hidrográficas: caracterização e manejo sustentável. In: Calijuro, M. do C. & Cunha, D. G. F. (org.). *Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão*. (p. 47-74). Rio de Janeiro: Elsevier.
- Souza, W. B., Abreu, V. H. S. e Ribeiro, M. I. de P. (2019, outubro). Um estudo Bibliométrico e Sistemático sobre o Planejamento de Sistemas de Drenagem Urbana. *Revista Boletim do Gerenciamento*, Rio de Janeiro, 9(9), p. 1-10.
- Suzuki, C. Y., Azevedo, A. M. e Kabbach Júnior, F. I. (2013). Drenagem subsuperficial de pavimentos: conceitos e dimensionamento. São Paulo: Oficina de Textos.
- Tennis, P. D., Leming, M. L. e Akers, D. J. (2008). *Pervious Concrete Pavements*. 3. ed. Illinois: Portland Cement Association.
- Tominaga, L. K. Desastres Naturais: por que ocorrem? (2015). In: Tominaga, L. K., Santoro, J. & Amaral, R. do (org.). *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. (p. 11-23). 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico.
- Tucci, C. E. M. Inundações urbanas. (2015). In: Tucci, C. E. M., Porto, R. La L. & Barros, M. T. (org.). *Drenagem urbana*. (p. 15-36). Porto Alegre: ABRH.



Tucci, C. E. M. Processos hidrológicos e os impactos do uso do solo. (2015). In: Tucci, C. E. M. & Braga, B. (org.). Clima e recursos hídricos no Brasil. (p. 31-76). Porto Alegre: ABRH.