

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PABLO FUCHS REICHERT

**EFEITOS NO BALANÇO HÍDRICO DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS EM
PAVIMENTOS PRÉ-FABRICADOS DRENANTES E NÃO DRENANTES**

FRANCISCO BELTRÃO - PR

2025

PABLO FUCHS REICHERT

**EFEITOS NO BALANÇO HÍDRICO DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS EM
PAVIMENTOS PRÉ-FABRICADOS DRENANTES E NÃO DRENANTES**

**EFFECTS ON THE STORMWATER BALANCE IN URBAN AREAS WITH
DRAINING AND NON-DRAINING PRE-FABRICATED PAVEMENTS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador(a): Wagner de Aguiar

FRANCISCO BELTRÃO - PR

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

PABLO FUCHS REICHERT

**EFEITOS NO BALANÇO HÍDRICO DAS ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS EM
PAVIMENTOS PRÉ-FABRICADOS DRENANTES E NÃO DRENANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação, 26 de junho de 2025

Prof. Dr. Wagner de Aguiar (UTFPR) - Orientador

Prof. Dr. Fernando Manosso (UTFPR)

Prof. Dr. Cleila Cristina Navarini Valdameri (UTFPR)

**FRANCISCO BELTRÃO
2025**

RESUMO

O crescimento urbano desordenado, sem planejamento prévio, apresenta frequentes problemas com alagamentos, devido à baixa taxa de infiltração das águas pluviais. No processo de urbanização, a cobertura vegetal é substituída por superfícies impermeáveis, o que impede a infiltração da água no solo, processo que contribui para o aumento da velocidade e do volume do escoamento superficial, elevando as vazões máximas, gerando alagamentos. Diante deste contexto, pavimentos drenantes mostram-se como uma alternativa para aumentar a infiltração e, conseqüentemente, reduzir o escoamento superficial. O presente estudo objetivou comparar os respectivos pavimentos: *pavers* não drenantes, *pavers* drenantes, placa de *paver* não drenante e placa de *paver* drenante, em termos de capacidade de infiltração, e relacionando os seus impactos nas vazões máximas em áreas urbanizadas com baixa e alta densidade populacional, pavimentos amplamente utilizados no meio urbano. Os experimentos foram efetuados na empresa Pavimenti Blocos e *Pavers* LTDA no município de Francisco Beltrão – PR, e simulados para diferentes cenários. Com os resultados, se identificou como as diferentes técnicas de pavimentação afetam a capacidade de infiltração no meio urbano, contribuindo para mitigar eventos de alagamentos provocados por precipitações extremas. As vazões máximas em áreas urbanas de alta densidade de ocupação com pavimento drenante foram em média 5% menores do que com uso de pavimentos não drenantes, com maior redução para o período de retorno de 100 anos. Já em áreas urbanas com baixa densidade de ocupação com pavimento não drenantes, foram em média 10% menores do que com uso de pavimentos não drenantes, com maior redução para o período de retorno de 100 anos.

Palavras-chave: Infiltração; *paver*; escoamento superficial; alagamentos; Francisco Beltrão

ABSTRACT

Unplanned urban growth often leads to frequent flooding problems due to the low infiltration rate of stormwater. During urbanization, vegetation cover is replaced by impermeable surfaces, which prevent water from infiltrating the soil. This process contributes to increased runoff velocity and volume, raising peak flows and causing floods. In this context, permeable pavements emerge as an alternative to enhance infiltration and consequently reduce surface runoff. This study aimed to compare non-permeable pavers, permeable pavers, non-permeable paver slabs, and permeable paver slabs in terms of infiltration capacity, and to analyze their impacts on peak flow in urban areas with both low and high population density. The experiments were carried out at the company Pavimenti Blocos e Pavers Ltda., in the municipality of Francisco Beltrão – PR, and simulations were conducted for different scenarios. The results showed how various paving techniques influence infiltration capacity in urban areas, contributing to mitigating flood events caused by extreme rainfall. In high-density urban areas, the use of permeable pavements resulted in an average reduction of 5% in peak flow compared to non-permeable pavements, with the greatest reduction observed for a 100-year return period. In low-density areas, the average reduction was around 10%, also with the most significant effect observed for the 100-year return period.

Keywords: Infiltration; paver; surface runoff; flooding

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Imagem 1 - Enchentes e inundações.	17
Imagem 2 - Mapa de Francisco Beltrão - PR	25
Imagem 3 - Representação dos cilindros de medição instalados.	26
Imagem 4 - <i>Pavers</i> com silicone nos espaçamentos.	27
Imagem 5 – Área no centro de Francisco Beltrão, considerada de alta densidade urbana	31
Imagem 6 - Área no bairro Vila Nova de Francisco Beltrão - PR, a qual apresenta uma baixa densidade urbana	32
Tabela 1 - Coeficientes de escoamento superficial para áreas urbanas.....	29
Tabela 2 - Valores das áreas de alta densidade	31
Tabela 3 - Valores da área de baixa densidade	32
Tabela 4 - Valores dos testes de infiltração por tipo de pavimento em laboratório.....	34
Tabela 5 - Uso e ocupação do solo em áreas de alta e baixa densidade com	

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

pavimento não drenantes e drenantes	35
Tabela 6 - Valores da intensidade da chuva nos tempos de retorno	36
Tabela 7 - Valores de vazões máximas nos cenários hidrológicos propostos.....	36
Tabela 8 – Valores para redução em % do tempo de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.....	37
Tabela 9 - Valores referentes à área de alta e baixa densidade urbana	38
Tabela 10 – Valores para as vazões médias de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.	39
Tabela 11 - Valores para o tempo de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.	40

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDF - Intensidade-Duração-Frequência

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Área da bacia (km^2)

C - Coeficiente de escoamento superficial (adimensional)

i - Intensidade da precipitação (mm/h)

Qp - Vazão máxima (m^3/s)

Vs - Volume de escoamento superficial (m^3)

Vt - Volume total de precipitação (m^3)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 PROBLEMAS GERADOS PELA URBANIZAÇÃO	14
3.2 ESCOAMENTO SUPERFICIAL	17
3.3 ALAGAMENTOS URBANOS.....	19
3.4 INFILTRAÇÃO	19
3.5 DRENAGEM URBANA.....	20
3.6 PAVIMENTO PERMEÁVEL, POROSO E PRÉ-FABRICADO	21
3.7 MANUTENÇÃO PARA PAVIMENTOS DRENANTES.....	23
4 MATERIAIS E METODOS	25
4.1 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DOS PAVIMENTOS....	25
4.2 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1 RESULTADOS DOS TESTES DE INFILTRAÇÃO NOS PAVIMENTOS	34
5.2 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA	35
5.2.1 Uso e ocupação do solo em cada cenário	35
5.2.2 Precipitações de projeto	36
5.2.3 Vazões máximas em cada cenário	36
5.2.3.1 Análise estatística dos resultados	37
6 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Segundo censo realizado pelo IBGE em 2022, 88,24% de toda a população do sul do país está concentrada nas áreas urbanas. Esse desenvolvimento urbano está associado à substituição de ambientes naturais ou seminaturais por construção, com o direcionamento das águas pluviais e dos esgotos para os corpos d'água adjacentes aos canais de drenagem (Haughton; Hunter, 1994).

Segundo Tucci (2007), a impermeabilização do solo reduz o tempo de concentração e aumenta o volume e a vazão de pico dos escoamentos, alterando de forma significativa o regime hidrológico natural das bacias hidrográficas, aumentando significativamente o escoamento superficial.

O crescimento desordenado dos centros urbanos resultou no comprometimento dos sistemas de drenagem, gerando assim um aumento no escoamento superficial e um grande impacto no ciclo hidrológico. Tucci e Tozzi (1998) apontam o aumento do escoamento superficial e da vazão máxima, por consequência, aumento de enchentes urbanas. Além da contaminação das águas pluviais e dos mananciais superficiais (Araújo; Tucci; Goldenfum, 2000).

O município de Francisco Beltrão apresenta uma população total de 96.666 habitantes (IBGE, 2022), apresentando um total de 84.847 habitantes ocupando a área urbana, ocasionando um crescimento territorial de forma desordenada. Com isso, a ocupação intensa do território, especialmente nas áreas centrais da cidade, reduz as superfícies permeáveis e dificulta a infiltração da água no solo. Já nas áreas com menor densidade de construções, a infiltração ocorre com mais facilidade, o que influencia diretamente o escoamento superficial. Entretanto, os pavimentos drenantes, como os *pavers*, se apresentam como uma alternativa para a redução do escoamento superficial, em função de sua capacidade de infiltração (Santos; Silva, 2019).

A relação das cidades com a drenagem pluvial não é de agora, de acordo com Tucci (2008), o histórico pode ser dividido em fases. Destaca que o Brasil ainda se encontra na fase Higienista, a qual visa afastar os efluentes líquidos e as inundações das pessoas, sem o controle dos resíduos sólidos, tratamento de esgoto ou conservação ambiental.

Conforme Canholi (2005), áreas urbanas cresceram de forma acelerada, sem planejamento no âmbito da drenagem urbana, causando uma problemática conhecida no meio urbano, os alagamentos.

A drenagem urbana tem como objetivo a coleta, transporte e disposição final das águas pluviais, para que não ocasione alagamentos. Com os cenários decorrentes de inundações em centros urbanos, profissionais buscam alternativas para o aumento da infiltração e a redução do escoamento superficial (Tucci, 2001).

Um material usado amplamente na pavimentação urbana, tem sido o *paver*, que é um tipo de pré-moldado de concreto misturado com agregados naturais, em conformidade com a ABNT NBR 9062 de 2017. Existem diferentes modelos de pavimentação permeável, classificados em não drenantes e drenantes, sendo os primeiros destacados pela elevada capacidade de infiltração. Dessa forma, a aplicação desses sistemas em estacionamentos, calçadas e parques contribui para a ampliação da infiltração da água em áreas urbanas, especialmente em regiões com alta densidade de edificações.

A utilização do *paver* drenante tem como objetivo principal reduzir o volume de escoamento superficial, assim contribuindo com a infraestrutura urbana dos municípios, aumentando a infiltração e tornando o gerenciamento do escoamento mais eficaz. Os pavimentos construídos com *pavers* ou placas têm se mostrado eficientes na mitigação do problema (Parra; Teixeira, 2015).

Sistemas com pavimentos drenantes são conhecidos por apresentar uma medida de controle eficaz, portanto são utilizados para suavizar os efeitos decorrentes do escoamento das águas pluviais urbanas. Pavimentação permeável pode ser utilizada como uma alternativa nas superfícies convencionais, tais como estradas, vias públicas, estacionamentos e calçadas (Beecham *et al.*, 2010 *apud* Lucke; Beechmam, 2011).

Visando minimizar efeitos de escoamento superficial, além dos dispositivos convencionais, pavimentos drenantes se mostram como solução na medida compensatória da drenagem urbana (Tucci; Bertoni, 2003). Capazes de promover a infiltração das águas da chuva no pavimento, atuam com um retardador nos picos das cheias, agindo diretamente sobre o hidrograma da bacia local (Asce, 1992).

Diante deste contexto, este trabalho tem como objetivo levantar as capacidades de infiltração de quatro tipos diferentes de pavimentos, dois com ampla utilização no processo de urbanização, *pavers* e placas não drenantes, e dois menos

utilizados, *pavers* e placas drenantes. Com estes resultados, simular os impactos no escoamento superficial e nas vazões máximas, em dois cenários de uso do solo urbano, um considerado de alta ocupação e outro de baixa ocupação, para diferentes condições de precipitação, para os pavimentos testados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os impactos no escoamento superficial do uso de pavimentos drenantes e não drenantes em dois cenários de densidade de uso do solo, sob diferentes condições de chuva.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

✓ Comparar os resultados da capacidade de infiltração nos diferentes tipos de pavimentos pré-fabricados como, *pavers* não drenante, *pavers* drenante, placa de *paver* não drenante e placa de *paver* drenante.

✓ Avaliar os impactos no escoamento superficial e nas vazões máximas, com base nos resultados obtidos, em dois cenários de uso do solo urbano, um considerado de alta ocupação e outro de baixa ocupação, para diferentes condições de precipitação, para os pavimentos testados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROBLEMAS GERADOS PELA URBANIZAÇÃO

Diversos fatores afetam o ciclo hidrológico devido à urbanização, tais como retirada da vegetação, impermeabilização do solo e alterações na topografia do terreno. Essas alterações geram danos à população, gerando inundações, modificando o escoamento superficial, podendo aumentar a erosão e o assoreamento de rios urbanos (Reis; Schmidt, 2014).

A urbanização sem um planejamento prévio vem seguida de inúmeros problemas, como complicações devido à pluviosidade, sendo uma delas o aumento do escoamento superficial. Uma das principais consequências do aumento dos níveis de escoamento superficial é a sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana, devido à retirada da cobertura vegetal e à inserção de concreto e asfalto, o que pode acarretar alagamentos. No sistema de drenagem urbana, o aumento do escoamento superficial ocorre devido à diminuição da infiltração, que é causada pela ocupação e impermeabilização do solo (Silva, 2007).

De acordo com Dunne e Leopold (1978, citados por Macedo, 2009), ocorre o rápido processo de escoamento superficial, juntamente com grandes cargas de poluentes. Essas condições proporcionam picos de cheias, causando os alagamentos urbanos. Os alagamentos são fenômenos naturais que, de acordo com Amaral e Ribeiro (2009), têm sua magnitude pelas seguintes características quantidade, intensidade e distribuição da precipitação e pelas características de infiltração no solo e grau de saturação.

As enchentes e inundações são estatisticamente os desastres antrópicos mais frequentes, respondendo por um terço do total de desastres entre 1980 e 1990, no mundo (Noji, 2000, citados por Phillipi; Salles; Silveira, 2005).

Segundo Tundisi (2006), o desenvolvimento econômico e a organização da sociedade humana promovem diversas mudanças no ciclo hidrológico, com a qualidade e a quantidade das águas.

No crescimento urbano, a cidade vai se desenvolvendo no ambiente de maior facilidade, os quais geralmente são de baixa ou sem declividade. A partir das construções, eles adaptam o meio ambiente às necessidades que surgirão (Maricato, 2001).

Para Acioly Jr. e Davidson (1998), a densidade populacional é um referencial relevante para avaliar tecnicamente e financeiramente a distribuição das terras urbanas, infraestrutura e serviços públicos em uma região de moradia.

O espaço urbano tem relação com a densidade populacional, assim os níveis de densidade são relacionados à existência de áreas verdes, redução para com o escoamento superficial. A intervenção da população no espaço natural poderá resultar em modificações na região habitada, gerando assim ações de planejamento, (Barros; Nayara, 2014).

Segundo Tucci (2008), o crescimento urbano ocorrido nas últimas décadas transformou o Brasil em um país urbano, tendo 83% da população vivendo em locais urbanos.

Para Tucci (1997), os principais impactos devido à urbanização na drenagem são o aumento do escoamento superficial, redução da evapotranspiração, redução do escoamento subterrâneo, rebaixamento do lençol freático, aumento da produção de material sólido proveniente da limpeza urbana e do armazenamento inadequado do resíduo.

Segundo o censo realizado pelo Instituto Brasil de Geografia e Estatística (IBGE) no ano de 2022 o Brasil possui uma densidade demográfica de 23,8 hab/km², assim sendo classificado como pouco povoado.

Para o local ser considerado zona urbana, tem que apresentar as seguintes características: concentração de pessoas, edifícios e serviços em uma área pequena comparada à zona rural, IBGE (2010).

Cidades que são consideradas de porte médio são os municípios cuja população urbana situa-se entre 100 mil e 500 mil habitantes, presentes nos censos demográficos de 1970 e 2010, segundo os seguintes autores: Santos (1994), Braga (2005), Maricato (2001), Amorim Filho e Serra (2001), Brito, Horta e Amaral (2001), Andrade e Serra (2001) e Lima (1998).

Segundo o censo elaborado pelo IBGE (2020), serão utilizadas as seguintes classificações: para a área urbana de alta densidade populacional, tendem a serem áreas com alta densidade de edificações. Para a área urbana de baixa densidade, será área em processos de expansão urbana, áreas verdes desabitadas, entre outras.

IBGE (2020) considera como área urbana locais que apresentam grande concentração de estruturas, edificações, domicílios e equipamentos urbanos como

pavimentação, rede elétrica e sanitária. E também que predominam superfícies artificiais não agropecuárias.

O desenvolvimento urbano não planejado, especialmente nas partes baixas das bacias hidrográficas, tem tido sérias consequências hidrológicas. Essa expansão muitas vezes vem acompanhada de ocupação irregular e reforço da impermeabilização do solo, comprometendo a capacidade natural do sistema de absorver e drenar as águas pluviais. Com a impermeabilização progressiva da área da cabeceira, a resposta hidrológica da bacia se torna mais rápida e intensa, levando ao aumento dos picos de vazão e, conseqüentemente, ao aumento da frequência e da gravidade das inundações nas áreas a jusante. Tucci (2007) afirma que, sem planejamento e controle de drenagem, o desenvolvimento urbano em direção às nascentes de uma bacia hidrográfica pode agravar as inundações a jusante, encurtando os tempos de formação de poças e aumentando significativamente os fluxos máximos. Além disso, como destaca Baptista (2002), o aumento das superfícies impermeáveis reduz a capacidade de infiltração e armazenamento temporário da água, transferindo rapidamente grandes volumes para os cursos d'água, que muitas vezes não estão dimensionados para essas novas condições de escoamento.

Amaral e Ribeiro (2009) consideram que chuvas intensas e/ou de longa duração favorecem a saturação dos solos, gerando um aumento do escoamento superficial e a concentração de água nessa localidade, referindo-se aos cursos d'água e áreas adjacentes em áreas urbanas. Lembram que o lançamento inadequado de lixo e entulho, principalmente nas proximidades dos cursos d'água, acentua esses problemas, já agravados pela impermeabilização dos solos por asfalto ou outras formas de selamentos superficiais comuns no meio urbano.

Imagem 1 - Enchentes e inundações.



Fonte: ministério das cidades/IPT (2007 *apud* Amaral; Ribeiro, 2009).

3.2 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial é o deslocamento das águas sobre a superfície do solo ou pavimento. Para a engenharia, é de suma importância em projetos de obras visando dimensionamentos capazes de suportar as vazões decorrentes do escoamento superficial (Porto; Tucci, 2009).

Escoamento superficial pode acarretar alagamentos urbanos, aumento da contaminação dos corpos de água, eventos que vêm apresentando um aumento intensificado nos centros urbanos (Chandrappa; Biligiri, 2016; Jiang *et al.*, 2015).

O escoamento superficial é resultado, principalmente, do limite da capacidade de infiltração. Pruski *et al.*, (2008) salientam que os fatores que influenciam na taxa de infiltração da água no solo interferem também no escoamento superficial. Fatores climáticos, geomorfológicos, geológicos, entre outros fatores que podem potencializar os alagamentos.

O pavimento permeável, além de promover redução do volume de escoamento superficial, também apresenta uma melhora na qualidade dessa água, que durante o escoamento pode ser poluída com metais pesados, óleos, resíduos, poeira, dentre outros (Thomle, 2010).

O escoamento superficial propicia um aumento na carga de poluentes que atinge os corpos d'água, pois ao percorrer sobre pavimentos e calçadas, promove o transporte dos poluentes presentes nesses locais até as águas receptoras, ocasionando sua degradação (Barrett *et al.*, 1998; Souza, 2012).

No ciclo hidrológico, é esperado que parte da precipitação seja absorvida pela vegetação. Com a continuidade da precipitação, os poros abertos se obstruem, ocasionando a saturação do solo. Com isso, o impacto das gotas tende a compactar o solo, fazendo um selamento na sua superfície e conseqüentemente reduzindo a capacidade de infiltração. Associando a isso, o escoamento superficial, sob precipitações intensas, o escoamento é maior, demonstrando a importância de ter pavimentos drenantes nos centros urbanos (Tucci 2001).

Os alagamentos têm sido um problema corriqueiro nos centros urbanos. Problemática que tem sido decorrente da descaracterização do solo natural, gerando um aumento no escoamento superficial, causando alagamento (Konrad, 2014). Localidades mais afetadas normalmente se encontram próximas a cursos d'água, pois apresentam cotas mais baixas e passam por aterramento e nivelamentos (Miyazaki *et al.*, 2012).

Para Silveira (2002), a impermeabilização do solo faz com que tenha um aumento no escoamento superficial, acarretando um maior volume de água para drenagem, favorecendo o acúmulo de água em pontos de saturação, provocando alagamentos nestes pontos.

Segundo Souza (2005), a melhora da infiltração apresenta ganhos econômicos, paisagísticos e ambientais, controlando não somente o pico da capacidade de infiltração, mas também o volume, frequência e duração, além da qualidade do escoamento.

Diante dos vários prejuízos ocasionados pelo escoamento, é de suma importância para a engenharia dimensionar as vazões máximas decorrentes do escoamento superficial. Estimativas das vazões máximas são frequentemente necessárias, tanto em bacias hidrográficas com ocupação rural, quanto nas urbanas (Bonta; Rac, 1992). Pois, com a obtenção dos valores do escoamento superficial vazão máxima, se pode conhecer o valor da vazão máxima no local.

Um dos métodos mais utilizados para áreas urbanas é o método racional, de acordo com Smedema e Rycroft (1983), que foi desenvolvido para estimar as vazões máximas de escoamento em pequenas bacias urbanas, nas quais a área impermeável é grande, e os valores de escoamento superficial se aproximam de um. Tal método parte do princípio de que a vazão máxima, proveniente de fortes chuvas, ocorre quando todas as partes da bacia contribuem simultaneamente com o escoamento.

3.3 ALAGAMENTOS URBANOS

Segundo Coelho (2001), a incidência das inundações influencia diretamente a classe média e alta a se afastarem das áreas urbanas como áreas de risco, fazendo com que a especulação imobiliária sobre as áreas mais nobres da cidade pressione a população menos favorecida a ocupar os ambientes naturais impróprios para moradia.

Segundo Tucci (2003), a maioria dos problemas relativos às inundações é consequência de uma visão distorcida do controle por parte dos profissionais que ainda priorizam projetos localizados sem uma visão da bacia e dos aspectos sociais e institucionais das cidades.

Outro fator relevante é que a impermeabilização dos solos urbanos, por reduzir a infiltração natural e, conseqüentemente, aumentar o escoamento superficial quando sob as condições de precipitações elevadas, decorrente de alterações climáticas, é responsável por constantes alagamentos e inundações, igualmente em várias cidades do mundo, com expressivas perdas socioeconômicas e de vidas humanas (Correia *et al.*, 2015; Smith *et al.*, 2016; Recanatesi *et al.*, 2017; Pilla *et al.*, 2019).

3.4 INFILTRAÇÃO

Infiltração é o processo pelo qual a água penetra em meios porosos. Esse fenômeno apresenta um papel fundamental no ciclo hidrológico, afetando diretamente a disponibilidade de água subterrânea, recarga de aquíferos e reduzindo a erosão do solo. A capacidade de infiltração é influenciada pela porosidade (Perroux; White, 1988; Everts; Kanwar, 1992), umidade prévia do solo (Araújo Filho; Ribeiro, 1996) e a intensidade da precipitação.

A infiltração depende diretamente das características físicas do solo, ou seja, da composição granulométrica, do arranjo estrutural das partículas e dos parâmetros hidrodinâmicos (Oliveira *et al.*, 2017).

No estudo da infiltração, deve-se ter o conhecimento da diferença entre a capacidade de infiltração e a taxa de infiltração. Capacidade de infiltração é a quantidade máxima de água que um solo pode absorver. A taxa de infiltração é a quantidade real de água infiltrada no solo. A taxa de infiltração pode igualar a

capacidade de infiltração quando a precipitação for superior à curva da capacidade de infiltração (Moura, 2005).

Para controlar a infiltração nas grandes cidades, é comum prefeituras exigirem, pelo seu Plano Diretor, que uma parte da área seja mantida permeável, variando entre 15% a 30% do terreno. Entretanto, nem sempre é possível atender a essa demanda. Uma forma para conseguir atender à legislação e ao mesmo tempo manter a área útil do terreno é por meio da instalação de pavimentos drenantes (Marchioni; Silva, 2011).

Sistemas compensatórios de infiltração preveem facilitar a retenção e o amortecimento do escoamento superficial, gerando a possibilidade do escoamento das águas pluviais para o subsolo, para assim desempenhar uma função de controle de fluxo de água na superfície (Miguez; Rezende, 2015).

A filtragem desempenha um papel vital na mitigação do impacto hidrológico das áreas urbanas, facilitando a infiltração de água no solo e, assim, reduzindo significativamente o escoamento superficial. Essa redução ajuda a diminuir os fluxos máximos gerados durante chuvas fortes, o que é fundamental para controlar enchentes e inundações, Tucci (1995). Salientou que a incorporação de processos de infiltração em projetos urbanos permite reduzir as vazões de pico, melhorando o desempenho do sistema de drenagem. Dessa forma, a infiltração se mostra como uma etapa importante no contexto da drenagem urbana.

3.5 DRENAGEM URBANA

Para todos os centros urbanos, é de suma importância ter um serviço de drenagem e manejo das águas, para se conseguir prevenir de alagamentos urbanos, inundações e eventuais deslizamentos.

Para Miguez *et al.* (2016), as percepções públicas da drenagem urbana se desenvolveram em ações tardias, negligenciadas para um sistema sustentável. Um sistema de drenagem urbana eficiente é de suma importância, pois sistemas precários podem provocar doenças e epidemias com grande taxa de mortalidade, como ocorreu na primeira fase que durou até o início do século XX.

Para Pereira e Ioto (2017), os impactos da urbanização são diversos, tanto nas características das águas pluviais quanto no sistema de drenagem urbana, sendo eles: melhora da qualidade das águas pluviais, redução na vazão de água

subterrânea, aumento da velocidade da água e efeitos indiretos decorrentes da urbanização. A qualidade da água pode ser alterada devido à presença de cargas poluidoras expressivas nas áreas urbanizadas, devido à "lavagem" que acaba ocorrendo durante as chuvas.

Segundo Souza (2012), quando se fala em pavimentação, efetuar os sistemas de microdrenagem para o escoamento da água é de suma importância; a prefeitura tem a responsabilidade de fazer a fiscalização. Microdrenagem, que segundo o Departamento de Engenharia Sanitária e Hidráulica da USP (2015) é definida por vias locais que fazem o recolhimento das águas pluviais e os levam até o sistema de macrodrenagem, sendo elas, sarjetas, bocas de lobo, bueiros, poços de visitas e galerias.

Os efeitos das chuvas são mais visíveis em grandes centros, devido à ocupação desordenada e ao crescimento em grande escala, fazendo com que o sistema de drenagem urbana não seja suficiente para garantir a demanda provinda das chuvas, devido à impermeabilização do local. Entretanto, devido a esses fatores, o sistema de drenagem urbana começou a fazer o uso de pavimentos drenantes, visando aumentar a capacidade de infiltração do local (Silva e Santos, 2018).

Conforme Canholi (2005), medidas não convencionais em drenagem urbana podem ser entendidas como estruturas, obras ou dispositivos, cujas soluções são diferentes do conceito tradicional de canalização.

A prática tradicional apresentava inconvenientes, pois com o deslocamento rápido do escoamento, o problema era transportado para a jusante dos rios e córregos, causando danos à população localizada nesses pontos da bacia (Canholi, 2005).

No atual cenário de alta urbanização, o aumento de construções, calçadas e construções de grande porte necessita fazer seu ciclo hidrológico natural. O pavimento poroso ou permeável é um mecanismo que pode auxiliar no escoamento dessas águas e também na taxa de permeabilidade do solo (Pruner, 2018).

3.6 PAVIMENTO PERMEÁVEL, POROSO E PRÉ-FABRICADO

O pavimento permeável é um dispositivo de infiltração no qual o escoamento superficial é desviado para dentro de um reservatório de pedras localizado sob a superfície do terreno (Urbonas e Stahre, 1993; Freni *et al.*, 2010). A sua utilização

em áreas urbanas visa reduzir a área drenada superficialmente, melhorar a qualidade da água e contribuir para o aumento da recarga da água subterrânea (Collins *et al.*, 2007; Kuang *et al.*, 2011).

BMPs (*Best Management Practices*) afirmam que alternativas, as quais visam retorno ou aproximar as condições de infiltração do solo, são superfícies compostas por revestimentos como concreto poroso, asfalto poroso e blocos intertravados (Bean *et al.*, 2004).

Para Tucci (2009), pavimentos drenantes são compostos por duas camadas de agregados, sendo um desses agregados fino ou médio e outro de agregado graúdo, mais a camada de pavimento permeável.

O pavimento drenante tem se destacado pela capacidade de infiltração. Sleight *et al.* (2006) relataram que a primeira aplicação do concreto poroso ocorreu no Reino Unido, em 1852. No entanto, essa tecnologia tem se tornado cada vez mais popular, sendo denominada de concreto ecológico (Fortes *et al.*, 2008).

Tal material apresenta uma mistura que apresenta elevada porcentagem de vazios de 15% a 25%, com uma matriz de agregados grandes. Desse modo, a estrutura possibilita uma redução do escoamento superficial, pois apresenta uma rápida infiltração da água, Menegatti (2018).

Fortes *et al.* (2006) afirmaram que tal concreto poroso promove pelo menos três vantagens comparado ao concreto tradicional, sendo esses benefícios, redução da hidroplanagem, redução do ruído, melhorando a poluição sonora, e o efeito *spray/splash*.

Reyes (2002), em seu estudo, afirma que na Espanha foram relatadas algumas vantagens de se trabalhar com o concreto poroso. Além da diminuição do escoamento superficial, ele melhora a trabalhabilidade, diminui a distância de frenagem dos veículos em condições adversas, diminui a intensidade dos reflexos de luz nos pavimentos, entre outros aspectos.

Pavimentos drenantes melhoram a qualidade das águas pluviais urbanas e atuam como reservatório para aproveitamento da água de escoamento superficial para fins não potáveis, de acordo com Paiva Coutinho & Artur (2011). Segundo Ullate - Gomes *et al.* (2010), apontam um estudo feito em pavimentos drenantes em um estacionamento na Espanha (área 4,2m x 2,4m), na qual a água armazenada nos reservatórios dos pavimentos drenantes poderia suprir a demanda de irrigação para um jardim de 10m² por um período aproximado de um mês.

O revestimento permeável age somente como um conduto rápido para o escoamento, para que chegue no reservatório (Araújo, 2000). Basicamente, o pavimento permeável age filtrando e armazenando a água de escoamento superficial, diminuindo o risco de alagamento (Scholz; Grabowiecki, 2004). Podendo assim ser coletada por tubos de drenagem e então levada a uma saída.

A ABNT NBR 9062/2017 é a norma brasileira que estabelece os requisitos para pavimentos pré-fabricados, que consiste no controle das estruturas. Ao se ter concebido uma peça, preferencialmente se deve procurar a repetição da própria, para que se tenha uma padronização. Durante o seu processo, são realizados testes com o composto utilizado, permitindo um controle de qualidade rigoroso.

Para pavimento drenante, segundo Azañedo *et al.* (2007), a granulometria, quantidade de cimento, relação água/cimento e quantidade de vazios são as principais propriedades do pavimento drenante. Portanto, é um pavimento com alto índice de vazios interligados, deixando o pavimento mais poroso. Sendo assim, é um ótimo material para se utilizar em áreas pavimentadas.

Estes pavimentos podem ser utilizados para o benefício, como a redução da temperatura da superfície, se comparado com o asfalto, possibilidade da absorção de água diretamente pelo solo, segurança no âmbito da antiderrapante, assim evitando possíveis quedas. Economia na instalação, pois é instalado sobre uma camada de pó de pedra ou areia, dispensando o uso de contrapiso, (DER Paraná 2023).

NBR 16416 (2015) é a norma responsável por estabelecer os critérios para pavimentos drenantes. Tal norma estabelece que o local de implantação do pavimento deve ser considerado, para atender às solicitações hidráulicas do pavimento permeável.

3.7 MANUTENÇÃO PARA PAVIMENTOS DRENANTES

Diversos autores recomendam uma limpeza periódica dos pavimentos, sendo essa limpeza com escovamento e jato de ar ou jato de água, para assim manter o desempenho do próprio (Tucci, 2005; Charger Enterprises, 2007; Greenworks, 2007; Obla, 2007).

A quantidade de sedimentos depende diretamente do volume de tráfego no local e da existência de fontes de sedimentos próximos ao pavimento. Árvores

também geram uma dificuldade para a infiltração, devido às folhas, retendo a água que deveria infiltrar, segundo o Instituto Água e Terra (IAT, 2002).

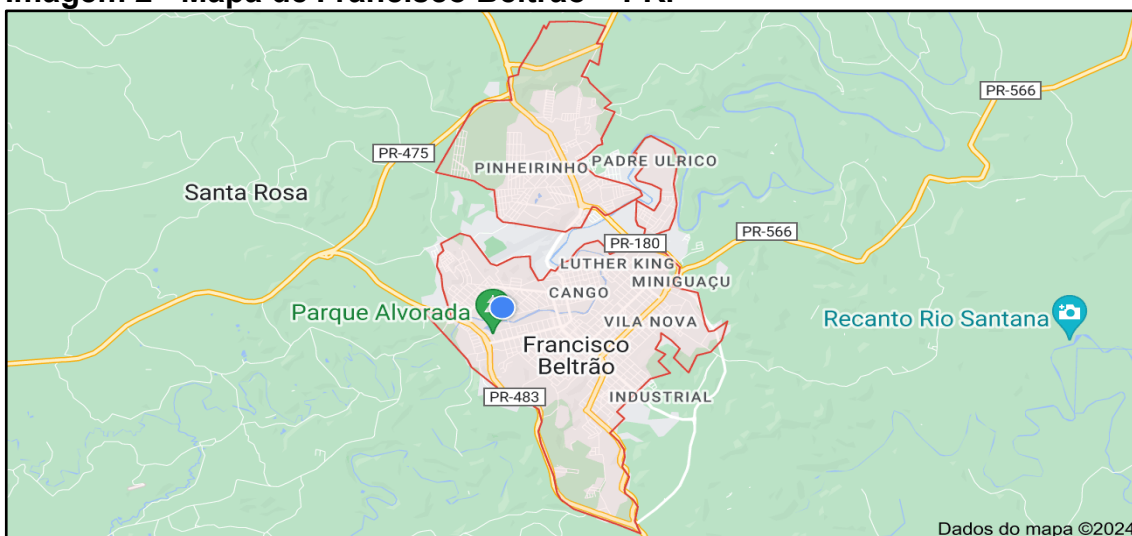
4 MATERIAIS E METODOS

O trabalho foi dividido em duas etapas experimentais: a primeira, medida da capacidade de infiltração, realizada na empresa Pavimenti - Blocos e Pavers Ltda. Já a segunda etapa foi realizada a simulação hidrológica dos cenários de ocupação do solo, com base no município de Francisco Beltrão – PR.

Para a execução da prática do experimento foram utilizados os respectivos materiais: *paver* drenante, *paver* não drenante, placa de *paver* drenante e placa de *paver* não drenante, todos materiais fornecidos pela empresa Pavimenti Ltda. O tempo obtido foi a demora para o líquido descer, infiltrando 50mm.

O trabalho foi realizado, no município de Francisco Beltrão - PR, com população de 96.666 (2022), área total de 735.111 km² e clima subtropical.

Imagem 2 - Mapa de Francisco Beltrão – PR.



Fonte: Google Maps, 2024.

4.1 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DOS PAVIMENTOS

Para este teste se utilizará um cilindro único, com diâmetro de 236 mm, juntamente com uma régua boia, para obtenção do tempo necessário para infiltração de 50mm em cada pavimento testado.

Para se obter os respectivos valores de infiltração, utilizou a seguinte fórmula (Eq. 1):

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

Onde:

I é o coeficiente de infiltração (mm/h);

M é a massa de água infiltrada (kg);

D é diâmetro interno do cilindro de infiltração (236 mm);

t é o tempo de infiltração (s);

K é o fator de conversão, igual à 4.583.666.000 (Sistema Internacional)

Inicialmente, se pretendia utilizar a norma americana ASTM C1701, entretanto, visando facilitar o processo prático, se adotou este outro método.

No teste, foram colocados os pavimentos sobre uma estrutura metálica fornecida pela empresa Pavimenti. Com o cilindro posicionado, fez-se a implementação do silicone, que tem como objetivo manter a água dentro do cilindro, tendo como única forma de saída a infiltração no pavimento. Ao colocar o silicone, era aguardado entre 30 a 60 minutos para a sua secagem. E a estrutura ficava da respectiva forma, representada na imagem 3:

Imagem 3 – Representação dos cilindros de medição instalados.



Fonte: Autoria própria (2025).

Ao secar, coloca-se a régua boia, dando início à execução dos experimentos.

Foram efetuadas nos pavimentos drenante três estruturas, e, em cada uma delas, realizaram-se três repetições, totalizando nove testes — sendo três com o pavimento seco e seis com ele previamente molhado.

Nos pavimentos não drenantes, realizou-se o mesmo procedimento, entretanto, como não apresentaram taxa de infiltração, foi realizado apenas um teste em cada estrutura.

Nos *pavers*, para evitar que a água escoasse pelos espaços, aplicou-se silicone, permitindo que a água passasse exclusivamente pelo pavimento, conforme está na foto abaixo:

Imagem 4 – Pavers com silicone nos espaçamentos.



Fontes: Autoria própria (2025).

Vale ressaltar que o método descrito foi aplicado exclusivamente em condições controladas, visando à avaliação da permeabilidade dos pavimentos em laboratório. No entanto, em situações reais de implantação em obras, onde ocorre a instalação, há presença de espaçamentos entre os *pavers*, por onde ocorrer a infiltração da água.

4.2 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Avaliação dos impactos do escoamento superficial foi realizada por meio da simulação das vazões máximas geradas para chuvas com período de retorno (T_r) de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, considerando dois cenários: baixa e alta densidade urbana. A quantificação das vazões máximas será pelo método racional, equação a seguir (Eq. 2):

$$Q_p = 0,278 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (2)$$

Onde:

Q_p - vazão máxima (m^3/s)

C - coeficiente de escoamento superficial (adimensional)

i - intensidade da precipitação de projeto (mm/h)

A - Área em Km^2

A determinação do coeficiente de escoamento superficial foi realizada por meio da amostragem, em triplicata, de quadras urbanas com baixa, média e alta densidade populacional, nas quais foi realizado o mapeamento dos usos do solo, com identificação em especial para as áreas que utilizam os pavimentos cuja capacidade de infiltração foi testada. Os valores desses coeficientes, já estabelecidos, estão apresentados em tabelas, como exemplificado na Tabela 1. Com os percentuais médios de cada uso, foram simuladas as vazões máximas geradas nos cenários com o uso dos diferentes pavimentos drenantes e não drenantes.

Tabela 1 – Coeficientes de escoamento superficial para áreas urbanas.

Tipo de superfície	Coeficiente de runoff C	Tipo de superfície	Coeficiente de runoff C
Pavimento asfáltico	0,95	Gramado plano entre 0 a 1% de decl.	0,25
Pavimento concreto	0,95	Gramado médio entre 1% a 3% de decl.	0,35
Pavimento de tijolos	0,85	Gramado alto entre 3% a 10% de decl.	0,40
Pavimento de pedras	0,75	Gramado muito alto >10% de decl.	0,45
Telhado linha de base	0,95	Vegetação plana (0 a 1% de decl.	0,10
Telhado verde < 10cm	0,50	Vegetação média (0 a 1% de decl.	0,20
Telhado verde entre 10cm e 20cm	0,30	Vegetação alta (0 a 1% de decl.	0,25
Telhado verde entre 20cm e 50cm	0,20	Vegetação muito alta (0 a 1% de decl.	0,30
Telhado verde > 50cm	0,10		

Fonte: LEED existing buildings, 2009.

A determinação do coeficiente de escoamento superficial foi feita baseada na capacidade de infiltração dos pavimentos testados e do solo da região, considerando a relação apresentada na equação (Eq. 3):

$$C = \frac{V_s}{V_t} \quad (3)$$

Onde:

C = Coeficiente de escoamento superficial

V_s = Volume de água que esco superficialmente (m³)

V_t = Volume total de precipitação na bacia (m³)

Os mapeamentos das áreas foram realizados de forma visual, pois, uma vez que não se teve acesso aos dados de densidade populacional do local, se optou por esse método.

Nas áreas selecionadas, as intervenções realizadas na simulação concentram-se nas calçadas, estacionamento e entradas. Para a simulação da substituição, foram utilizados pavimentos drenante e não drenante. Para a análise comparativa, foram simulados dois cenários, com quatro variações em cada um deles.

A intensidade de precipitação de projeto será determinada por meio da equação IDF (intensidade-duração-frequência) para Francisco Beltrão/PR, conforme apresentado na equação (Eq. 4):

$$i = \frac{1012,28 \cdot Tr^{0,182}}{(t + 9)^{0,76}} \quad (4)$$

Onde:

i = intensidade da chuva (mm/h)

Tr = tempo de recorrência (anos)

t = duração da chuva (minutos)

O método racional recomenda que o tempo de duração da chuva (t) seja igualado ao tempo de concentração da bacia de drenagem, considerando que as áreas amostradas como de baixa e alta densidade populacional devem ser quadras urbanas, com pequenas áreas e tempos de concentração. Este trabalho adotou o tempo de duração da chuva padronizado de 10 minutos.

Foi utilizado como tempo de recorrência 5, 10, 25, 50 e 100 anos, para se ter chuvas de intensidades diversas.

Para determinar as áreas de baixa e alta densidade, se utilizou o Google Earth, selecionando quadras do município de Francisco Beltrão – PR, assim se relacionando com o escoamento superficial que afetará cada ambiente.

A discussão sobre as densidades urbanas é uma discussão antiga, na qual o arquiteto Frank Lloyd Wright determinou que perímetros urbanos de baixa densidade apresentariam 10 hab/ha. Já para perímetros de alta densidade, Le Corbusier determinou 3000 hab/ha (Nobre, 2006). Entretanto, como não se tem os respectivos dados, se realizou uma análise visual para estimar os locais de alta e baixa densidade populacional.

Foram considerados os seguintes cenários para a simulação hidrológica:

- 1 - alta densidade com paver não drenante;
- 2 - baixa densidade com paver não drenante;
- 3 - alta densidade com paver drenante;
- 4 - baixa densidade com paver drenante.

Imagem 5 – Área no centro de Francisco Beltrão, considerada de alta densidade urbana.



Fonte: Google Earth, área localizada no Centro de Beltrão - PR, 2025.

Tabela 2 - Valores das áreas de alta densidade.

Uso do solo	Área (m ²)	Percentual (%)
Área de calçamento, estacionamento e entradas	11.135,42	12,98
Área com jardins	3.923,04	4,57
Área de asfalto	7.290,19	8,50
Área com telhados	63.422,43	73,95
Total	85.771,08	100

O objetivo da quantificação dos usos do solo em cada área de alta e baixa densidade urbana, considerados neste trabalho, é a geração de cenários com uso de pavimentos não drenantes e drenantes, em locais que geralmente são usados, como calçadas, entradas de garagem e estacionamentos.

Imagem 6 – Área no bairro Vila Nova de Francisco Beltrão – PR, a qual apresenta uma baixa densidade urbana.



Fonte: Google Earth, área localizada no Bairro Vila Nova de Francisco Beltrão - PR, 2025.

Tabela 3 - Valores da área de baixa densidade.

Uso do solo	Área (m ²)	Percentual (%)
Área de calçada, entrada de garagem e estacionamento	3.473,47	11,32
Área com telhados	7.348,01	23,95
Área asfaltada	6.804,48	22,18
Área sem construção (gramado)	13.050,55	42,55
TOTAL	30.676,51	100

4.3 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística foi realizada com base nos dados simulados das vazões máximas, obtidos por meio do método racional, para os respectivos cenários e considerando todos os tempos de retorno.

No cálculo das vazões médias, foi calculada a média para cada tipo de pavimento, separadamente para as áreas de alta e baixa densidade. O desvio

padrão das vazões foi calculado para avaliar a variabilidade dos resultados entre os diferentes tempos de retorno em cada pavimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DOS TESTES DE INFILTRAÇÃO NOS PAVIMENTOS

Na tabela 4 apresenta-se os valores obtidos nos testes em laboratório, para demonstrar a capacidade de infiltração de cada pavimento.

Tabela 4 - Valores dos testes de infiltração por tipo de pavimento em laboratório.

Pavimentos	Infiltração (mm/h)		
	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Placa não Drenante	Teste 1	Teste 2	Teste 3
1	0		
Paver não Drenante	Teste 1	Teste 2	Teste 3
1	0		
Paver Drenante	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Paver 1	11.682,24	10.615,71	10.706,64
Paver 2	13.943,11	13.024,26	13.502,57
Paver 3	18.910,74	17.111,57	16.728,00
Placa Drenante	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Placa 1	14.551,80	10.624,73	10.727,31
Placa 2	14.573,01	10.164,67	9.529,25
Placa 3	13.234,52	10.817,83	9.439,30

Para a placa e *paver* não drenantes, não apresentam valores pois não mostraram valor de infiltração, pois são materiais impermeáveis. O motivo para a ausência de infiltração é a inexistência de espaços vazios entre os materiais, o que impossibilita a ocorrência do fenômeno.

Os *pavers drenantes* apresentam uma variação maior nos resultados devido a utilização de seis peças, podendo ter variação nos espaçamentos dos *pavers*. Como no teste das placas só foi utilizada uma unidade, a variação é muito menor entre os testes. O maior valor encontrado foi no *paver 3*, com até 13.234,52 mm/h.

Ao comparar os valores de infiltração com as intensidades de precipitação de Francisco Beltrão - PR (tabela 6), nota-se que, mesmo nas chuvas mais intensas 249,72 mm/h, associadas a um tempo de retorno de 100 anos, os pavimentos

drenantes apresentam capacidade de infiltração próxima ou superior à da precipitação.

Para o tempo de retorno de 5 anos, todos os pavimentos drenantes apresentam capacidade de infiltração total.

Contudo, deve-se considerar que a capacidade de infiltração depende de outros fatores, como o material subjacente. Em condições reais, a infiltração dependerá da base sob o solo, geralmente composta por camadas de britas ou solo compactado, capacidades variáveis de absorção. Portanto, o solo atua como elemento limitante do sistema.

5.2 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

5.2.1 Uso e ocupação do solo em cada cenário

Com os valores de cada cenário, mostrados nas tabelas 2 e 3, podemos realizar uma média ponderada para o coeficiente de deflúvio.

Para os valores de C (coeficiente de deflúvio), se utilizaram valores pré-calculados, sendo 0,45 para *paver* não permeável e 0,10 para *paver* permeável (Débora Apolinario, *et al.*, 2017). Com esses valores e utilizando os valores da tabela 1, se realizou uma média ponderada para encontrar o valor de C.

Tabela 5 - Uso e ocupação do solo em áreas de alta e baixa densidade com pavimento não drenantes e drenantes.

Uso do solo	Alta densidade/não drenante		Alta densidade/drenante		Baixa densidade/não drenante		Baixa densidade/drenante	
	%	C	%	C	%	C	%	C
Pavimentos	12,98	0,45	12,98	0,10	11,32	0,45	11,32	0,10
Jardins	4,47	0,20	4,47	0,20	23,95	0,95	23,95	0,95
Asfalto	8,50	0,95	8,50	0,95	22,18	0,95	22,18	0,95
Telhado	73,95	0,95	73,95	0,95	42,55	0,25	42,55	0,25
C ponderado	0,85		0,81		0,60		0,56	

5.2.2 Precipitações de projeto:

Para o desenvolvimento dos resultados, foram realizados os seguintes cálculos para encontrar a intensidade da chuva.

Resultando nos seguintes valores, para um tempo de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos, considerando uma duração da chuva de 10 minutos para o município de Francisco Beltrão.

Tabela 6 - Valores da intensidade da chuva nos tempos de retorno.

Período de retorno (anos)	Intensidade da precipitação (mm/h)
5	144,76
10	164,23
25	194,03
50	220,12
100	249,72

5.2.3 Vazões máximas em cada cenário:

Com a finalidade de facilitar a comparação dos resultados, se adotou a mesma medida de área para as situações, sendo esse valor uma média das duas áreas 0,0582km².

Tabela 7 – Valores de vazões máximas nos cenários hidrológicos propostos.

Cenários de uso do solo	Período de retorno (anos)				
	5	10	25	50	100
Alta densidade com pavimento não drenante	*1,99	2,26	2,67	3,03	3,43
Alta densidade com pavimento drenante	1,90	2,15	2,54	2,88	3,27
Baixa densidade com pavimento não drenante	1,40	1,59	1,88	2,14	2,42
Baixa densidade com pavimento drenante	1,26	1,43	1,69	1,92	2,18

*Vazões máximas em m³/s.

Observa-se que, em todos os cenários e para todos os períodos de retorno analisados, o uso de pavimentos drenantes resultou em vazões máximas menores em comparação com pavimentos não drenantes. Isso confirma a eficácia dos pavimentos drenantes na redução do escoamento superficial.

Tabela 8 – Valores para redução em % do tempo de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Tempo de retorno (anos)	Redução (%)	
	Alta densidade	Baixa densidade
5	4,52	10,0
10	4,87	10,06
25	4,87	10,11
50	5,95	10,28
100	4,66	9,92

Esses resultados demonstram que os pavimentos drenantes são eficazes tanto em contextos urbanos mais consolidados quanto em áreas em expansão. Sua aplicação pode contribuir significativamente para a mitigação de enchentes.

A diferença nas reduções obtidas entre os dois tipos de densidade também destaca a importância do planejamento urbano e do uso racional dos solos. Em locais com menos adensamento, o uso de pavimentos drenantes mostra uma eficiência ainda maior pois atua em conjunto com o solo exposto e áreas verdes.

5.2.3.1 Análise estatística dos resultados

Com base nos dados de vazão máxima simulada nos diferentes cenários, tabela 7, foi realizada uma análise estatística para melhor compreensão da eficácia dos pavimentos drenantes.

Tabela 9 – Valores referentes à área de alta e baixa densidade urbana.

Vazão média dos pavimentos	Vazão (m ³ /s)
Alta densidade	
Não drenante	2,68
Drenante	2,55
Redução média	
Absoluta (m ³ /s)	0,13
Percentual (%)	4,85
Desvio padrão dos pavimentos (adimensional)	
Não drenante	0,52
Drenante	0,50
Baixa densidade	
Não drenante	1,89
Drenante	1,70
Redução média	
Absoluta (m ³ /s)	0,19
Percentual (%)	10,05
Desvio padrão dos pavimentos (adimensional)	
Não drenante	0,37
Drenante (%)	0,36

A análise revela que, nas áreas de baixa densidade, os pavimentos drenantes são mais eficazes na redução da vazão máxima, com redução percentual de aproximadamente 10%. Já nas áreas de alta densidade, os ganhos são mais modestos, mas ainda relevantes, mostrando uma redução percentual de quase 5%. Os valores de desvio padrão indicam consistência nos resultados obtidos entre os diferentes períodos de retorno.

Tabela 10 – Valores para as vazões médias de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Tipo de Pavimento	Vazão Média (m³/s)	Redução Absoluta (m³/s)	Redução Percentual (%)	Desvio Padrão
Tempo de retorno de 5 anos				
Não Drenante	1,70	0,22	12,98	0,42
Drenante	1,48			0,45
Tempo de retorno de 10 anos				
Não Drenante	1,93	0,21	10,91	0,47
Drenante	1,72			0,51
Tempo de retorno de 25 anos				
Não Drenante	2,28	0,25	10,99	0,56
Drenante	2,03			0,60
Tempo de retorno de 50 anos				
Não Drenante	2,59	0,26	10,06	0,64
Drenante	2,33			0,68
Tempo de retorno de 100 anos				
Não Drenante	2,93	0,29	9,91	0,72
Drenante	2,64			0,77

A Tabela 10 apresenta valores médios de vazão simulada para diferentes períodos de retorno, comparando os cenários com pavimentos drenantes e não drenantes.

Nota-se que, para todos os tempos de retorno, houve uma redução percentual superior a 9%, sendo o maior valor significativo observado no tempo de retorno de 5 anos, 12,98%. Isso indica que os pavimentos drenantes são particularmente eficazes na contenção de escoamento resultante de chuvas frequentes de menor intensidade.

A redução absoluta das vazões médias também é consistente, com valores que aumentam progressivamente com o tempo de retorno, alcançando até 0,29 m³/s para 100 anos, o que demonstra a capacidade dos pavimentos drenantes de amortecer os picos de cheia, mesmo em eventos extremos.

A seguir, abela 11, apresenta-se uma análise detalhada das vazões máximas observadas em cada tempo de retorno simulado (5, 10, 25, 50 e 100 anos), considerando os diferentes cenários. Evidenciando a diferença na vazão com os

pavimentos não drenantes para os drenantes. Valores de referência utilizados com os dados representados na tabela 7.

Tabela 11 – Valores para o tempo de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Tempo de retorno (anos)	Redução (m ³ /s)	
	Alta densidade	Baixa densidade
5	0,09	0,14
10	0,11	0,16
25	0,13	0,19
50	0,15	0,22
100	0,16	0,24

De forma geral, os dados indicam maior redução de vazão proporcionada pelos pavimentos drenantes, quanto maior o tempo de retorno, mostrando um crescimento progressivo no desempenho do sistema drenante mesmo em áreas mais impermeabilizadas.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos dos pavimentos pré-fabricados drenantes e não drenantes na infiltração da água pluvial e no escoamento superficial em áreas urbanas com diferentes densidades de ocupação. Por meio de simulações hidrológicas, foi possível comprovar a eficácia dos pavimentos como medida compensatória para mitigar os impactos da urbanização no ciclo hidrológico.

Os resultados demonstraram que os *pavers* não drenantes e placas não drenantes não apresentaram nenhuma capacidade de infiltração. Por outro lado, os *pavers* e placas drenantes mostraram-se altamente eficientes, com tempo de infiltrações baixos, o que favorece a redução do escoamento superficial.

A simulação hidrológica demonstrou uma redução significativa das vazões máximas em todos os cenários em que foram aplicados os pavimentos drenantes, independentemente da área. Em média, as chuvas com tempo de retorno selecionadas, com a substituição de pavimentos não drenantes por drenantes representaram uma redução de aproximadamente 5,0% na vazão máxima em áreas de alta densidade, e cerca de 10% em áreas com baixa densidade. Diferença que evidencia o potencial dos pavimentos para amenizar os riscos.

Além disso, os cálculos de aumento de infiltração comprovam um ganho relevante na retenção de água no solo, reforçando a importância do uso dos pavimentos drenantes em projetos urbanos sustentáveis.

Portanto, conclui-se que a utilização de pavimentos drenantes é uma alternativa viável e eficaz para a melhoria da drenagem urbana. Estratégia que pode ser utilizada tanto em áreas já consolidadas quanto em novos loteamentos, promovendo uma urbanização mais resiliente e sustentável.

Vale ressaltar que, é uma medida complementar para a mitigação dos alagamentos, sozinho não irá resolver este dilema presente na realidade. Por isso esta medida deve ser utilizada com outras a fim de melhorar a problemática dos alagamentos urbanos.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, Laura Albuquerque. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005.
- ARAUJO, Paulo Roberto de; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; GOLDENFUM, Joel Avruch. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 5, n. 3 (jul./set. 2000), p. 21-29, 2000.
- ARAUJO, Paulo Roberto de; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; GOLDENFUM, Joel Avruch. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol. 5, n. 3 (jul./set. 2000), p. 21-29, 2000.
- ASTM (2009) C1701/C1701M - **Standard test method for infiltration rate of in place pervious concrete**. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pensilvânia.
- BARROS, Nayara S. **A Densidade e a Morfologia Urbana como parâmetros para o Planejamento de Bacias Hidrográficas**. 2014.
- BECKER, Nayara; PINHEIRO, Ivone Gohr. Potencialidade dos pavimentos permeáveis na melhoria da qualidade da água do escoamento superficial: uma revisão. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11, p. e20180009, 2019.
- BENINI, Rubens de Miranda; MENDIONDO, Eduardo Mario. Urbanização e impactos no ciclo hidrológico na bacia do Mineirinho. **Floresta e Ambiente**, v. 22, p. 211-222, 2015.
- CANHOLI, Aluísio. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. Oficina de textos, 2015.
- CAUDURO, Flávia; DE MATOS, Henrique. Drenagem e a Urbanização-Estudo de caso dos impactos da urbanização no sistema de drenagem em uma cidade de pequeno porte. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc-CIVILTEC**, v. 5, n. 2, p. 58-76, 2021.
- COLLINS, K.A; HUNT, W.F; HATHAWAY, J.M. (2007). **Hydrological and water quality comparison of four types of permeable pavement and standar asphalts in eastern** North Carolina. *Journal of Hydrological Engineering* 13(12) p. 1146 – 1157.
- DA SILVA, Adriana Maria; PEREIRA, Carlos Eduardo Ribeiro Fontella; ALVES, Rosane Martins. **Impacto das inundações nas cidades: caso do município de Duque de Caxias**. Simpósio Nacional De Gestão E Engenharia Urbana 4.00 (2023).
- DE HOLANDA, Marco Aurélio Calixto Ribeiro; SOARES, Willames de Albuquerque; DE OLIVEIRA, Diogo Botelho Correa. Predição do escoamento superficial e

consequentes alagamentos em centros urbanos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 5, p. 1-11, 2020.

DOS SANTOS, Flávio Augusto Altieri; DA ROCHA, Edson José Paulino. Alagamento e inundação em áreas urbanas. Estudo de caso: cidade de Belém. **Revista GeoAmazônia**, v. 1, n. 02, p. 33-55, 2014.

FERRAZ, Caio Mário Leal. Inundações e alagamentos em meio urbano: uma perspectiva teórico-conceitual, em abordagem geomorfológica. **Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas, Teófilo Otoni**, n. 20, p. 1-16, 2021.

FERREIRA, Maurício Lamano. ferramentas ambientais aplicadas ao planejamento de cidades sustentáveis.

FORTES, R. M., MERIGHI; J. V., BANDEIRA; A. A. **Laboratory Studies on performance of porous concrete**. 10th International Symposium on Concrete Roads – Brussels, Belgium, 2006 (b).

JABUR, Andrea Sartori et al. Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. **Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos**. Porto Alegre, RS. Vol. 20, n. 4 (out./dez. 2015), p. 937-945, 2015.

IMHOF, Arnaldo Wesley et al. Pavimentos drenantes: estudo sobre peças de concreto permeável do tipo Paver intertravado poroso. **Revista da UNIFEBE**, v. 1, n. 27, 2022.

KUANG, X; SANSALONE, J; YING, G; RANIERI, V. Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement. **Journal of Hydrology**, 2011. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.11.024.

MOURA, THALES AUGUSTUS MOREIRA. **Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial em ambientes urbanos**. Distrito Federal, 2005.

OBLA, K. H. **Pervious Concrete for Sustainable Development**. Recent Advances in Concrete Technology, Sep, Washington DC. 2007.

PAIVA COUTINHO, Artur. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

PARRA, Geovana Geloni; DO NASCIMENTO TEIXEIRA, Bernardo Arantes. Análise da permeabilidade e dos métodos de instalação de pavimentos permeáveis contidos em artigos científicos e em catálogos técnicos. **Revista nacional de gerenciamento de cidades**, v. 3, n. 15, 2015.

RESPLANDES, Isadora Silva et al. Ausência de sistemas de drenagem urbana nos pavimentos de Santana do Araguaia-PA e seus impactos. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 7, n. 1, p. 12111-01-09e, 2021.

REYES, F.; TORRES, A. Concreto poroso: tecnologia e investigación para su uso em pavimentos. **Revista Noticreto nº65. Colombia**, p. 56-61, 2002.

RODRIGUES, Lorrany Antunes Alves *et al.* **Impacto do processo de urbanização na formação de enchentes e alagamentos em Belo Horizonte, MG**. 2020.

ROSA, Andressa Ferreira. **Os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico no município de Patrocínio-MG**. 2017.

SOUZA, Christopher Freire; CRUZ, Marcus Aurélio Soares; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Desenvolvimento urbano de baixo impacto: planejamento e tecnologias verdes para a sustentabilidade das águas urbanas. **Rbrh: revista brasileira de recursos hídricos**. Porto Alegre, RS. Vol. 17, n. 2 (abr./jun. 2012), p. 9-18, 2012.

SLEIGHT, R; MARKS, A; GWILYM, K. **Panel Discussion: Use of Porous Concrete Pavements in Washington - East and West APWA - Wenatchee Fall Conference**, October 18. 2006

STAMM, Cristiano *et al.* A população urbana e a difusão das cidades de porte médio no Brasil. **Interações (Campo Grande)**, v. 14, p. 251-265, 2013.

TARGA, Marcelo dos Santos *et al.* Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, p. 120-142, 2012.