



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS DE CONCRETO EM UM BAIRRO RESIDENCIAL NO MUNICÍPIO
DE DIVINÓPOLIS, MINAS GERAIS**

Henrique Amorim Vaz

Belo Horizonte

2021

Henrique Amorim Vaz

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS DE CONCRETO EM UM BAIRRO RESIDENCIAL NO MUNICÍPIO
DE DIVINÓPOLIS, MINAS GERAIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária

Orientador: Prof. MSc. André Luiz Marques Rocha

Belo Horizonte

2021

HENRIQUE AMORIM VAZ

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTOS
PERMEÁVEIS DE CONCRETO EM UM BAIRRO RESIDENCIAL NO MUNICÍPIO DE
DIVINÓPOLIS, MINAS GERAIS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária

Banca examinadora:

André Luiz Marques Rocha – Presidente da banca examinadora
Prof. MSc. – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Lineker Max Goulart Coelho
Prof. Dr. - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Ricardo José Gontijo Azevedo
Prof. Dr. - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Emitido em 12/04/2021

ATA Nº 9/2021 - DCTA (11.55.03)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 12/04/2021 14:00)
ANDRÉ LUIZ MARQUES ROCHA
PROFESSOR ENS BÁSICO TECN TECNOLÓGICO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: 2143906

(Assinado digitalmente em 12/04/2021 14:40)
LINEKER MAX GOULART COELHO
PROFESSOR ENS BÁSICO TECN TECNOLÓGICO
DBC (11.56.07)
Matrícula: 1095344

(Assinado digitalmente em 12/04/2021 15:51)
RICARDO JOSE GONTIJO AZEVEDO
PROFESSOR ENS BÁSICO TECN TECNOLÓGICO
DGEO (11.55.13)
Matrícula: 2144499

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sij.cefetmg.br/documentos/> informando seu número:
9, ano: 2021, tipo: ATA, data de emissão: 12/04/2021 e o código de verificação: ae8386d09c

“Não nos congratulemos, entretanto, com nossas vitórias humanas sobre a natureza. Pois a cada vitória a natureza se vingará de nós. Cada vitória, é verdade, traz numa primeira instância os resultados esperados, mas em segunda e terceira instâncias, ela engendra efeitos muito diferentes e imprevistos, que, com frequência, anulam os primeiros”

Friedrich Engels

RESUMO

VAZ, HENRIQUE. **Análise da viabilidade técnica de utilização de pavimentos permeáveis de concreto em um bairro residencial no município de Divinópolis, Minas Gerais**. 2021. 86 páginas. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

O crescimento urbano tradicional, facilmente observado nas grandes cidades, acarretou em problemas urbanos variados, hoje associados a um planejamento inadequado no passado. As inundações urbanas são um fenômeno que a drenagem tradicional, ou higienista, tentou solucionar, mas os resultados não saíram como o esperado. Atualmente, acredita-se que a melhor maneira de resolver esse problema seja com a drenagem sustentável, com o emprego de medidas não-estruturais e estruturais, chamadas técnicas compensatórias. Sabendo-se que a impermeabilização do solo é o principal fator agravante das inundações urbanas, as técnicas compensatórias que promovem a infiltração da água pluvial no solo são de grande relevância. Pavimentos permeáveis são uma dessas técnicas, os quais contribuem para a redução do escoamento superficial, além de outros benefícios ambientais. Os municípios do interior muitas vezes reproduzem os padrões de expansão característicos das metrópoles, com impermeabilização do solo e canalização de cursos d'água e, por isso, é fundamental integrar elementos da drenagem alternativa a esse modelo clássico, para prevenir o agravamento das inundações e dos alagamentos. Novos loteamentos, diferentemente de áreas já consolidadas da cidade, têm a capacidade de considerar a utilização de pavimentos permeáveis desde a fase de projeto, se desenvolvendo sob uma ótica mais sustentável e antecipando a solução de problemas futuros, não necessariamente que acometerão seu interior, mas também áreas a jusante. Por isso, esse trabalho objetivou verificar a viabilidade técnica do emprego de pavimentação permeável de concreto em trechos de vias públicas do Bairro Residencial Boa Vista, loteamento localizado no município de Divinópolis, no interior de Minas Gerais. Ainda, a metodologia desse estudo contou com o dimensionamento dos dispositivos a partir de métodos relevantes da literatura e com a análise das interferências desses pavimentos sobre o escoamento superficial, as vazões conduzidas e os diâmetros das galerias subterrâneas. O trabalho foi conduzido para uma área do bairro, denominada área 1, sendo possível obter resultados para o dimensionamento da espessura da camada reservatório dos pavimentos na faixa de 38,1 cm a 74,2 cm, reduções no escoamento superficial sobre os trechos com pavimentação permeável de 83,3%, diminuições nas vazões captadas por bocas de lobo na ordem de 11,9% a 83,3%, além de reduções na vazão

de saída de 14,3% para a área 1 e de 4,2% para o bairro todo. Não foi possível a redução dos diâmetros adotados das galerias, devido às baixas reduções nos diâmetros calculados, de 2,9% a 5,6%, impossibilitando ganhos econômicos nesse aspecto. De modo geral, o Bairro Residencial Boa Vista mostrou-se adequado à instalação de pavimentos permeáveis e espera-se, com esse trabalho, incentivar estudos semelhantes, bem como disseminar maiores conhecimentos sobre a técnica.

Palavras-Chaves: Drenagem Urbana. Técnicas Compensatórias. Pavimentos Permeáveis. Dimensionamento. Viabilidade Técnica.

ABSTRACT

VAZ, HENRIQUE. **Analysis of the technical feasibility of using permeable concrete pavements in a residential allotment in the municipality of Divinópolis, Minas Gerais.** 2021. 86 pages. Monography (Undergraduate in Environmental and Sanitary Engineering) – Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

Tradicional urban growth, easily observed in large cities, has led to various urban problems, today associated with inadequate planning in the past. Urban flooding is a phenomenon that traditional drainage tried to solve, but the results did not go as expected. Currently, it is believed that the best way to solve this problem is with sustainable drainage, with the use of non-structural and structural measures, called compensatory techniques. Knowing that the waterproofing of the soil is the main aggravating factor of urban floods, the compensatory techniques that promote the infiltration of rainwater in the soil are very relevant. Permeable pavements are one of these techniques, which contribute to the reduction of runoff, in addition to other environmental benefits. Smaller cities often reproduce the expansion patterns characteristic of metropolises, with waterproofing of the soil and channeling of water courses and, therefore, it is essential to integrate elements of alternative drainage to this classic model, to prevent the aggravation of floods. New urban allotments, unlike consolidated areas of the city, have the capacity to consider the use of permeable pavements since the project phase, developing under a sustainable perspective and anticipating the solution of future problems. Therefore, this work aimed to verify the technical feasibility of employing permeable concrete paving in stretches of public roads in Bairro Residencial Boa Vista, an allotment located in Divinópolis, Minas Gerais. Still, the methodology of this study relied on the dimensioning of the permeable pavements using relevant methods from the literature and with the analysis of the interference of these pavements on the surface runoff, the flow rates and the diameters of the underground galleries. The work was carried out in an area of the allotment, called area 1, being possible to obtain results for the dimensioning of the thickness of the reservoir layer of the pavements in the range of 38.1 cm to 74.2 cm, reductions in runoff over sections with permeable pavement of 83.3%, decreases in flows captured by mainholes in the range of 11.9% to 83.3%, in addition to reductions in the outflow of 14.3% for area 1 and 4.2% for the entire area. It was not possible to reduce the adopted diameters of the galleries, due to the low reductions in the calculated diameters, from 2.9% to 5.6%, making economic gains in this respect impossible. In general, the allotment proved to be suitable for the installation of

permeable pavements and it is hoped, with this work, to encourage similar studies, as well as to disseminate greater knowledge about the technique.

Keywords: Urban Drainage. Compensatory Techniques. Permeable Pavements. Dimensioning. Technical Viability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivo Geral.....	17
2.2	Objetivos Específicos.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	Breve Reflexão e Contextualização das Inundações Urbanas no Cenário Atual.....	18
3.2	Ciclo Hidrológico.....	23
3.3	Drenagem Urbana Tradicional.....	24
3.3.1	Projeto de Microdrenagem	28
3.4	Sustentabilidade na Drenagem Urbana.....	30
3.4.1	Jardins de Chuva.....	33
3.4.2	Microrreservatórios Individuais	34
3.4.3	Poços de Infiltração	36
3.4.4	Telhados Verdes	38
3.4.5	Pavimentos Permeáveis	39
3.4.5.1	Conceitos e Definições	40
3.4.5.2	Estado da Arte	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1	Área de Estudo.....	52
4.2	Procedimentos.....	57
4.2.1	Diagnóstico do Sistema de Drenagem da Área	58
4.2.2	Projeto do Pavimento Permeável de Concreto	63
4.2.2.1	Metodologia Elaborada por Silveira e Goldenfum.....	65
4.2.2.2	Método do Manual de Drenagem Urbana de Curitiba.....	67
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1	Análise da Viabilidade Técnica	69
5.2	Dimensionamento dos Pavimentos Permeáveis.....	73
5.3	Redução do Escoamento Superficial	76
6	CONCLUSÃO	83
7	REFERÊNCIAS	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Visão integrada da gestão das águas urbanas.....	19
Figura 3.2 – Aumento de nível da enchente devido à urbanização	21
Figura 3.3 – Gráfico comparativo das vazões antes e depois da urbanização.....	22
Figura 3.4 – Ciclo hidrológico global.....	24
Figura 3.5 – Ribeirão canalizado e tamponado em duas épocas distintas.....	25
Figura 3.6 – Disposição da microdrenagem e da macrodrenagem numa bacia	27
Figura 3.7 – Fluxograma da sequência de elementos da microdrenagem	28
Figura 3.8 – Representação do sistema de microdrenagem de uma via pública	29
Figura 3.9 – Planilha típica do cálculo hidráulico da rede de microdrenagem	30
Figura 3.10 – Comparação dos sistemas de drenagem clássico e alternativo	31
Figura 3.11 – Jardim de chuva em via pública.....	33
Figura 3.12 – Representação de jardim de chuva em planta	34
Figura 3.13 – Esquema de captação de água de chuva em uma residência.....	35
Figura 3.14 – Poço de infiltração em uma área de lazer infantil, na França	37
Figura 3.15 – Modelo de implantação de poço de infiltração	38
Figura 3.16 – Funções dos telhados verdes no ambiente urbano	39
Figura 3.17 – Exemplos de tipos de pavimentos permeáveis.....	42
Figura 3.18 – Esquema de funcionamento de pavimentos permeáveis.....	43
Figura 3.19 – Seção típica de pavimento permeável de concreto pré-moldado.....	44
Figura 3.20 – Seção de pavimento de concreto permeável moldado no local de infiltração total	44
Figura 3.21 – Seção de pavimento de concreto permeável moldado no local de infiltração parcial	45
Figura 3.22 – Seção de pavimento de concreto permeável moldado no local sem infiltração.....	45
Figura 3.23 – Pavimentos estudados por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000).....	49
Figura 3.24 – Análise estatística dos resultados de condutividade hidráulica para carga constante	50
Figura 3.25 – Análise estatística dos resultados de condutividade hidráulica para carga variável	50
Figura 4.1 – Inundação da ETA do Itapecerica.....	53
Figura 4.2 - Vista área do Bairro Residencial Boa Vista, em Divinópolis – MG	54
Figura 4.3 – Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo	56
Figura 4.4 – Imagem aérea da área 1.....	60
Figura 4.5 – Imagem aérea da área 1, aproximada.....	60
Figura 4.6 – Imagem aérea dos trechos selecionados para a pavimentação permeável	62

Figura 4.7 – Representação esquemática da altura da camada reservatório.....	66
Figura 5.1 – Viabilidade da técnica segundo critérios de solo e aquífero	69
Figura 5.2 – Viabilidade da técnica segundo condições superficiais do terreno.....	70
Figura 5.3 – Viabilidade da técnica segundo a dinâmica de urbanização	71
Figura 5.4 – Sugestão de composição do concreto permeável	76
Figura 5.5 – Imagem aérea das bocas de lobo afetadas.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Percentual de remoção de poluição com o uso de pavimentos porosos	46
Tabela 3.2 – Relações de concreto permeável estudados por Costa et al. (2019)	51
Tabela 4.1 – Quantitativo de materiais das galerias por lançamento	58
Tabela 4.2 – Quantitativo de trechos das vias compatíveis com a técnica	59
Tabela 4.3 – Quadro de medidas das ruas da área 1	61
Tabela 4.4 – Detalhamento dos trechos compatíveis com a técnica.....	62
Tabela 4.5 – Valores mínimos para o dimensionamento mecânico do pavimento	64
Tabela 5.1 – Resultados do dimensionamento conforme Silveira e Goldenfum.....	74
Tabela 5.2 – Resultados do dimensionamento conforme Manual de Drenagem Urbana de Curitiba.....	74
Tabela 5.3 – Resultados do dimensionamento escolhido com tempo de retorno de 5 anos....	75
Tabela 5.4 – Redução do escoamento superficial por trecho com pavimentação permeável..	77
Tabela 5.5 – Redução do escoamento superficial por boca de lobo afetada	78
Tabela 5.6 – Redução do escoamento superficial na área 1 e no bairro todo.....	79
Tabela 5.7 – Redução da vazão e do diâmetro calculado por galeria.....	81

1 INTRODUÇÃO

A maioria das cidades brasileiras cresceu sem um planejamento adequado. Assim, diversos problemas surgiram e muitos deles persistem até os dias atuais. A drenagem urbana, bem como outros setores, não conseguiu acompanhar o rápido aumento populacional e suas consequências no meio ambiente, tornando-se cada vez mais ineficiente em solucionar problemas que frequentemente afetam o dia a dia dos cidadãos, como são as inundações urbanas.

As inundações urbanas tornaram-se um fenômeno comum, em especial nas grandes cidades. Anualmente, durante a estação chuvosa, o noticiário aponta as consequências desse problema, que vão de congestionamentos a perdas de bens materiais e vidas humanas. Após o ocorrido, as prefeituras despendem altas doses de recursos financeiros para a recuperação dos danos, as pessoas retomam suas atividades cotidianas e o problema acaba sendo esquecido, até o retorno do período chuvoso e o repetir desse ciclo.

Em Minas Gerais, as fortes chuvas que ocorreram no início do ano de 2020, além de destruírem casas, pontes e ruas, provocaram a morte de 55 pessoas e deixaram mais de 30.000 desalojadas ou desabrigadas (G1 MINAS, 2020). Ainda, 197 municípios tiveram o estado de calamidade pública ou de situação de emergência reconhecido pelo Ministério do Desenvolvimento Regional de Minas Gerais (G1 MINAS, 2020). Cabe ressaltar que esses números remetem não somente às inundações, mas também a outro desastre ocasionado pelas chuvas, que é o desabamento de encostas, assunto de igual relevância no planejamento ambiental e urbano.

Hoje, é notório que as inundações urbanas não foram solucionadas pela drenagem urbana tradicional (também chamada higienista), aquela caracterizada pela condução rápida das águas para jusante. O que se verificou na realidade foi uma transferência do problema para outras áreas da bacia (TUCCI, 2007). A intensa impermeabilização é a principal causa desse fenômeno, pois impede a infiltração das águas precipitadas e aumenta o escoamento superficial. Outros fatores também contribuem para esse cenário, como a retirada da cobertura vegetal e as alterações no relevo das cidades.

A drenagem urbana sustentável é a melhor alternativa para contornar esse problema. Diferentemente da abordagem higienista, esse modelo foca na valorização da retenção e infiltração como formas de manter o hidrograma do cenário urbanizado o mais próximo possível do natural (pré-urbanização), diminuindo o volume escoado e a vazão de pico. Esse

modelo de gestão das águas urbanas conta com diferentes técnicas e dispositivos que, dispostos de maneira planejada na bacia, podem resultar em uma melhoria na qualidade de vida dos habitantes das cidades.

Os sistemas sustentáveis de drenagem urbana surgiram nos países desenvolvidos e recebem diferentes nomenclaturas, como: *Low Impact Development – LID*, nos Estados Unidos; *Water Sensitive Urban Design – WSUD*, na Austrália; e *Sustainable Drainage Systems - SUDS*, na Inglaterra (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012). No Brasil, são conhecidos como Técnicas Compensatórias.

Alguns exemplos de dispositivos (medidas estruturais, como será melhor detalhado) que integram esse modelo são as bacias de retenção ou detenção, jardins de chuva, microrreservatórios individuais, pavimentos permeáveis, poços de infiltração, telhados verdes, trincheiras de infiltração, valas/valetas e planos de infiltração.

Inundações urbanas são um problema consolidado nas metrópoles brasileiras, ou seja, uma realidade. Ainda que seja mais facilmente percebido nesses locais, tal fenômeno não se limita às capitais, muito pelo contrário, ele tem caminhado cada vez mais para os municípios do interior, os quais insistem em repetir os padrões equivocados de crescimento tipicamente característicos dos grandes centros urbanos.

Partindo do pressuposto básico de que prevenir é sempre melhor que remediar, é fácil concluir que planejar o desenvolvimento das cidades pequenas e médias, ainda em expansão, tendo como objetivo um horizonte futuro livre de inundações, é opção mais atrativa que o crescimento desordenado clássico que regeu a urbanização no território brasileiro no século XX.

Considerando a reflexão exposta nos parágrafos anteriores, bem como a necessidade de transição do atual modelo higienista para um modelo de drenagem urbana sustentável, além da relativa contemporaneidade da temática nos cenários acadêmico e, principalmente, profissional brasileiros e pelo fato de que municípios com menos de 500.000 habitantes (pequenos e médios) representam aproximadamente 73% da população brasileira (TUCCI, 2007), o presente trabalho objetiva realizar uma análise da viabilidade da utilização da técnica compensatória pavimentação permeável em um município de médio porte.

Foi selecionado o município mineiro de Divinópolis (atualmente, com 240.408 habitantes), importante cidade do centro-oeste do estado que sofre com o problema das inundações urbanas, situação comum em cidades com características semelhantes às suas, como o tamanho e a presença de cursos d'água cortando a zona urbana. Mais especificamente, como será devidamente detalhado na metodologia, para a condução deste estudo de caso foi selecionado o loteamento referente ao bairro residencial Boa Vista, um empreendimento em fase de execução na mesma época da elaboração desta monografia.

Dentre as várias técnicas compensatórias existentes atualmente, foi selecionado o pavimento permeável de concreto. O que justifica tal escolha é o fato da área de estudo ser um bairro residencial, com tráfego leve (a técnica é menos indicada para áreas com tráfego intenso), bem como o fato de poder ser implantada em vias públicas, não necessitando investimentos extras para os moradores do bairro, como poderia ocorrer com dispositivos implantados no interior dos lotes, e a disponibilidade de diversos trabalhos sobre a técnica.

Ainda, as superfícies destinadas ao sistema viário ocupam cerca de 30% das áreas urbanas (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005). Outros fatores interferem na viabilidade dos pavimentos permeáveis e estes serão discutidos no decorrer do trabalho, como parte dos procedimentos. Por fim, pretende-se, com o dimensionamento desse dispositivo, analisar a interferência no escoamento superficial da área de estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como principal objetivo realizar o dimensionamento e analisar a viabilidade técnica da utilização de pavimentos permeáveis de concreto em um bairro residencial, partindo de uma reflexão crítica sobre a problemática das inundações urbanas e suas possíveis soluções, até o estudo de caso para a aplicação dos conhecimentos obtidos e conclusão da hipótese inicial.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica dos conteúdos necessários para esse estudo;
- Tomar conhecimento das características da área de estudo fundamentais para o emprego da técnica;
- Efetuar o dimensionamento dos pavimentos permeáveis de concreto segundo as principais metodologias encontradas na revisão bibliográfica;
- Analisar as principais interferências da utilização dos dispositivos sobre o escoamento superficial, bem como as vazões conduzidas e os diâmetros das galerias da rede de drenagem do bairro;
- Concluir sobre a viabilidade técnica da pavimentação permeável na situação apresentada, estendendo a discussão para além do estudo de caso.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Breve Reflexão e Contextualização das Inundações Urbanas no Cenário Atual

A expansão urbana, na maioria das cidades brasileiras, ocorreu de forma que desconsiderasse alguns aspectos relevantes do meio ambiente, como o ciclo hidrológico. Esse descaso permitiu que grande parte da população ocupasse áreas inadequadas, de grande risco geológico, como encostas e áreas de várzea, sujeitando essas pessoas a correrem riscos que poderiam ser evitados se houvesse um planejamento prévio.

Os principais riscos relacionados às águas nas cidades são o deslizamento de encostas e as inundações urbanas. As cidades concentram mais de 85% dos brasileiros e são palco da maior parte dos problemas ambientais (BRASIL, 2020). Percebe-se a relevância (e a complexidade) dos ambientes urbanos no cenário nacional, sendo o planejamento dos mesmos de fundamental importância na busca por um desenvolvimento socialmente e ambientalmente justo.

Sabe-se que nas grandes cidades houve um processo de desconcentração urbana em direção à periferia, o que deixou o centro desabitado e degradado (TUCCI, 2007). Esse fato pode desencadear uma série de aspectos negativos, como: o aumento do tráfego de veículos pelo deslocamento de pessoas de suas residências para seus locais de trabalho (frequentemente em áreas centrais) e vice-versa; a destinação inadequada de esgoto doméstico e resíduos sólidos, devido à escassez de serviços de saneamento nessas áreas periféricas ou até mesmo à falta de consciência ambiental das pessoas; a ausência de sistemas de drenagem pluvial; entre outros.

Tais aspectos característicos do meio urbano geram uma variedade de impactos ambientais. Poluição do ar e da água, proliferação de vetores e aumento da incidência de doenças de veiculação hídrica, erosão do solo, assoreamento de cursos d'água, deslizamentos e inundações são apenas alguns exemplos. Segundo Brasil (2020), 103 milhões de brasileiros vivem sem acesso a tratamento de esgoto, 35 milhões vivem sem acesso a água potável e 36 milhões de toneladas de lixo não encontram destinação adequada anualmente.

Uma importante característica do modelo de gestão das cidades é a divisão dos serviços relacionados às águas urbanas em diversos setores. Segundo Tucci (2007), atualmente a gestão é fragmentada, como se fosse possível dividir a cidade em fatias setoriais. Fica evidente que essa fragmentação pode dificultar o entendimento, tanto dos gestores quanto da população, de que os processos envolvidos no meio urbano são interligados.

Esse modelo tem sido realizado com pouco foco no conjunto da cidade, atuando sobre problemas pontuais e sem um planejamento preventivo, ao contrário da visão mais moderna, que compreende o planejamento integrado da água na cidade (TUCCI e BERTONI, 2003). A figura 3.1 oferece uma sugestão de como deveria ser a visão integrada da gestão das águas nos municípios em um cenário ideal:

Figura 3.1 – Visão integrada da gestão das águas urbanas



Fonte – Tucci e Bertoni (2003)

Por exemplo, uma má gestão do uso e ocupação do solo pode resultar no surgimento de áreas muito adensadas e impermeabilizadas, elevando o tráfego de veículos na região. Uma má gestão da limpeza urbana pode prejudicar o sistema de drenagem através de obstruções nos condutos. Na área impermeabilizada citada, o excesso de resíduos nas ruas contribuiria para o aumento dos alagamentos nos períodos chuvosos, tendo como consequência os danos às propriedades e o aumento das doenças de veiculação hídrica. Em situações mais extremas, a perda de bens materiais (como os carros em excesso nas ruas) e até mesmo a perda de vidas.

Esse exemplo é uma situação simples, retratada apenas para demonstrar que a solução para problemas como as inundações urbanas não virá única e exclusivamente de mudanças e reparos realizados no sistema de drenagem, mas essencialmente de uma interação efetiva entre as diversas partes que ordenam o planejamento ambiental e urbano.

Cabe ressaltar como é nítido no contexto das cidades que a intensidade com que os impactos dos desastres são sentidos por cada parcela da população varia. Os mais pobres, por morarem

em regiões mais vulneráveis, conseqüentemente menos valorizadas economicamente, são os principais atingidos. Não somente o local que habitam os deixam mais expostos aos riscos (muitas vezes se trata de ocupações irregulares), como também as técnicas de construção utilizadas em suas moradias, as quais costumam ser muito mais simples e, por vezes, menos seguras que aquelas utilizadas em regiões mais nobres ou por pessoas com maior poder aquisitivo.

Segundo Tucci (2007), a principal vulnerabilidade socioeconômica ao risco de desastres é a pobreza. As regiões mais valorizadas da cidade geralmente apresentam técnicas de controle e minimização de riscos muito mais robustas, por exemplo com relação à fundação dos edifícios e à contenção de encostas, garantindo maior segurança às construções. Essa diferença é percebida inclusive no momento posterior ao desastre, em que a reparação dos danos é muito mais rápida para a população detentora de maior poder econômico.

Um fato historicamente presente no cenário nacional é a cultura de despreocupação com a prevenção, priorizando quase sempre a recuperação dos danos já ocorridos, o que certamente não pode ser considerada a melhor estratégia de desenvolvimento para um país ou uma cidade. Segundo Tucci (2007), a falta de tradição em gestão de riscos pode ser justificada pela ausência de riscos de desastres naturais no espaço físico brasileiro, como terremotos, tsunamis e furacões. Em países desenvolvidos e com histórico de desastres naturais frequentes, o crescimento urbano ocorreu dando-se a devida atenção às possíveis catástrofes. Esse preparo pode ser observado tanto nas técnicas utilizadas em obras de infraestrutura quanto na mentalidade da população.

Muitas cidades brasileiras foram projetadas ignorando-se completamente os cursos d'água presentes na região, sob a premissa de que a construção de canais e galerias para a transposição de córregos solucionaria qualquer obstáculo construtivo que os mesmos pudessem impor ao desenvolvimento da cidade. Passados os anos, constatou-se que essa técnica tradicional de drenagem pluvial trouxe consigo o agravante de outro problema, não mais de cunho técnico, mas social e ambiental, que são as inundações urbanas.

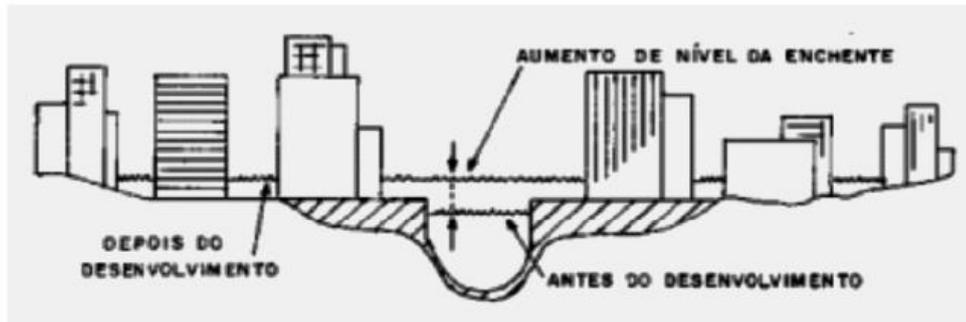
Segundo Neto et al. (2004), em cidades de médio porte registram-se transformações em decorrência da atividade humana, inclusive nos regimes hidrológicos. Os processos inadequados de urbanização e impacto ambiental observados nas regiões metropolitanas estão sendo reproduzidos nas cidades de médio porte (TUCCI, 2002). Essas afirmações indicam que a maneira com que os seres humanos constroem o ambiente urbano torna-se insustentável com

o passar do tempo. Independentemente do tamanho da cidade, problemas poderão surgir, ainda que em escala e proporção diferentes. É importante atentar-se a isso e pensar soluções o quanto antes.

O crescimento urbano alterou as características da bacia natural e a impermeabilização do solo é responsável pela diminuição da infiltração e consequente aumento do escoamento superficial. Segundo Miguez, Veról e Rezende (2016), o ambiente construído leva à concentração de pessoas e bens, ao mesmo tempo em que favorece o agravamento das enchentes. É evidente a incompatibilidade entre esses agentes e parece ocorrer uma espécie de competição pelo ambiente urbano, onde todas as partes (população e cursos d'água) sofrem algum tipo de prejuízo.

A partir da figura 3.2 é possível compreender de que forma a impermeabilização resultante do crescimento urbano aumenta o nível das enchentes dos rios, gerando consequentemente maiores inundações:

Figura 3.2 – Aumento de nível da enchente devido à urbanização

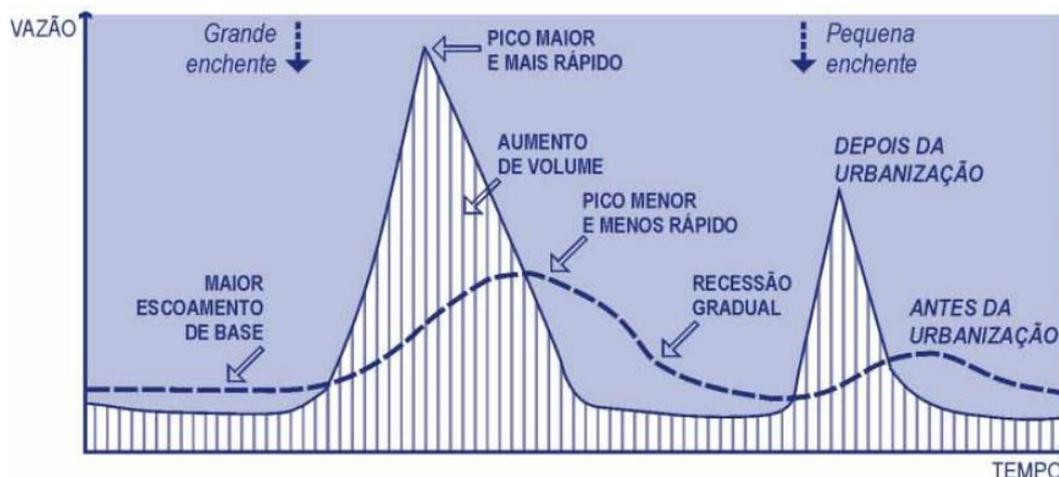


Fonte – Tucci e Bertoni (2003)

Fica claro, pela figura anterior, que a redução das áreas permeáveis, tanto pelas edificações quanto pela pavimentação das vias, faz com que um maior volume seja escoado para os cursos d'água, elevando seu nível máximo em épocas de cheia. Ainda, o aumento de nível da enchente é consequência não somente do aumento do volume, como também da velocidade elevada com que essas águas chegam à macrodrenagem, resultado da diminuição das intercepções naturais no terreno e do princípio da condução rápida das águas para jusante.

A figura 3.3 exhibe um gráfico de vazão *versus* tempo comparando as duas situações: antes e depois da urbanização. O pico maior e mais rápido, além do aumento de volume, refere-se ao que foi descrito no parágrafo anterior.

Figura 3.3 – Gráfico comparativo das vazões antes e depois da urbanização



Fonte – SUDERHSA (2002)

O projeto tradicional de drenagem urbana possui como princípio básico o escoamento rápido das águas pluviais para jusante (TUCCI, 2007). Esse modelo é capaz de controlar as inundações localmente, mas piora as condições em outros pontos da bacia, sendo, portanto, insustentável. É justo afirmar que o que ocorre é apenas a transferência do problema, não sua solução de fato. Esse é o formato de gestão da drenagem urbana que a maioria dos municípios brasileiros utiliza, e as consequências negativas já podem ser percebidas em parte deles. Cabe ainda destacar que as técnicas clássicas de drenagem proporcionam baixo valor social e ecológico ao local (TOMINAGA, 2013).

É possível integrar soluções de drenagem com a revitalização e valorização do espaço urbano, sendo um caminho importante para resolver o problema das cheias (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016). Essa ideia tem sido utilizada no modelo de gestão das águas pluviais em muitos países desenvolvidos, como Estados Unidos, Inglaterra e Austrália. Apesar de ser ainda uma realidade distante do cenário brasileiro, já existem projetos de drenagem sustentáveis sendo aplicados em algumas cidades, como Porto Alegre, São Paulo e Santo André (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012).

Conforme Tucci (2007), os princípios básicos para uma boa gestão das inundações urbanas são: considerar toda a bacia; considerar o desenvolvimento futuro; não transferir impactos para jusante; e controlar impactos relacionados à erosão, qualidade da água e biodiversidade.

As cidades são dinâmicas e crescem a cada dia. É necessária uma gestão que se atente às necessidades atuais e proponha as melhores soluções disponíveis, considerando o potencial e

as limitações de cada local e procurando beneficiar o máximo de indivíduos. A drenagem tradicional tem seus defeitos, mas não se deve abandonar os fundamentos desenvolvidos no setor ao longo dos anos (é fundamental conservar o conhecimento), e sim adaptá-la a uma nova realidade, realizando as mudanças necessárias para se alcançar maior sustentabilidade. Não existem fórmulas mágicas, mas evidências do que tem funcionado ou não, bem como pesquisas que merecem maior atenção da comunidade externa às academias.

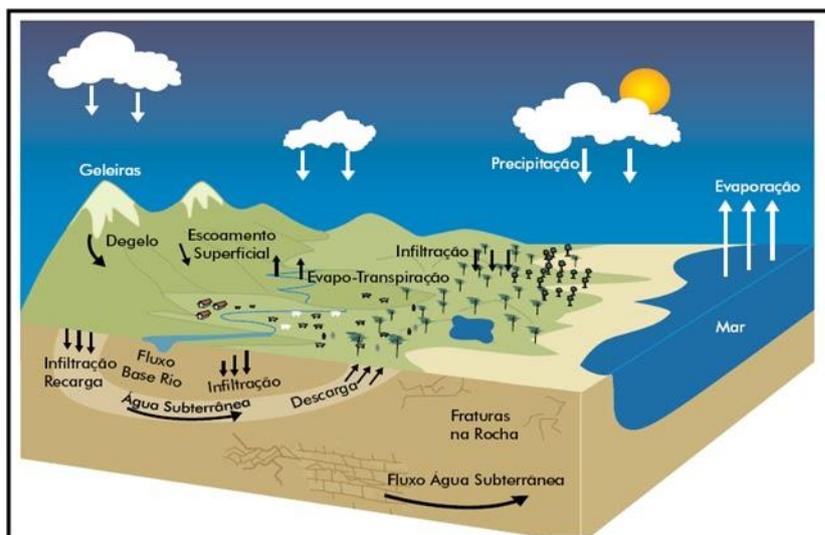
Segundo Tominaga (2013), o manejo sustentável das águas pluviais compreende a utilização de um conjunto de medidas de controle na fonte ou de controle do escoamento superficial integradas com as estruturas clássicas de drenagem. Hoje em dia, destaca-se a limitação do espaço disponível no meio urbano e a nova drenagem é capaz de contornar esse problema ao possibilitar funções simultâneas para um mesmo ambiente. Atividades de lazer e manutenção da diversidade biológica podem ser incorporadas às estruturas dos sistemas sustentáveis sem prejudicar o objetivo principal de controlar as cheias, contribuindo ainda para a melhoria da qualidade da água (TOMINAGA, 2013).

Como foi apontado na introdução, o início do ano de 2020 forneceu boas evidências de que algo precisa ser feito. As mudanças climáticas fazem com que as chuvas sejam cada vez mais imprevisíveis e o investimento em sistemas de previsão e alerta, ainda que de grande importância, não é capaz de resolver o problema sozinho. Sendo as inundações urbanas um fato consumado e considerando o grande número de atingidos anualmente por esse fenômeno, com perdas materiais e de vidas, é de extrema necessidade a busca por soluções, sejam elas de cunho técnico ou político, a fim de minimizar os impactos das fortes chuvas que atingem as cidades.

3.2 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico pode ser entendido como um sistema fechado que descreve a dinâmica da água no planeta. Devido à sua complexidade, é usualmente representado de maneira simplificada, desconsiderando as parcelas menos significantes, a depender do objetivo do estudo (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016). As principais parcelas do ciclo hidrológico são: escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo; evaporação de superfícies líquidas; evapotranspiração (evaporação da água do solo e transpiração dos seres vivos); infiltração; interceptação vegetal; precipitação; e retenção em depressões do terreno.

Na figura 3.4 é possível visualizar as parcelas do ciclo hidrológico global:

Figura 3.4 – Ciclo hidrológico global

Fonte – Fonte Hídrica (2011)

A urbanização interfere no equilíbrio do ciclo hidrológico, favorecendo algumas parcelas em detrimento de outras. Segundo Fritzen e Binda (2011), a impermeabilização do solo, a remoção da vegetação, as alterações morfológicas na topografia, as obras de engenharia nos canais fluviais e a deposição irregular de resíduos são as principais causas das alterações no ciclo hidrológico urbano. Assim, o planejamento ambiental e urbano deve visar a minimização dos impactos decorrentes de tais atividades.

Conforme Tucci (2007), a impermeabilização e a canalização alteram o balanço hídrico na bacia urbanizada. Essa impermeabilização é devido à construção de obras de alvenaria, acessos públicos para pedestres e pavimentação asfáltica (FRITZEN e BINDA, 2011). As principais consequências observadas são o aumento do volume do escoamento superficial, a redução da recarga dos aquíferos (diminuindo também o escoamento subterrâneo) e a redução da evapotranspiração (TUCCI, 2007). Esse desequilíbrio pode provocar diferentes fenômenos, sendo as inundações apenas um exemplo.

3.3 Drenagem Urbana Tradicional

Surgidos no século XIX, os preceitos higienistas para a drenagem pluvial preconizavam a rápida evacuação das águas do meio urbano, colaborando para a circulação viária e o desenvolvimento das cidades, além de combater doenças de veiculação hídrica (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005). É possível afirmar que esse modelo foi eficiente em resolver os problemas daquela época, visto que não havia controle sobre os resíduos e dejetos da população, os quais

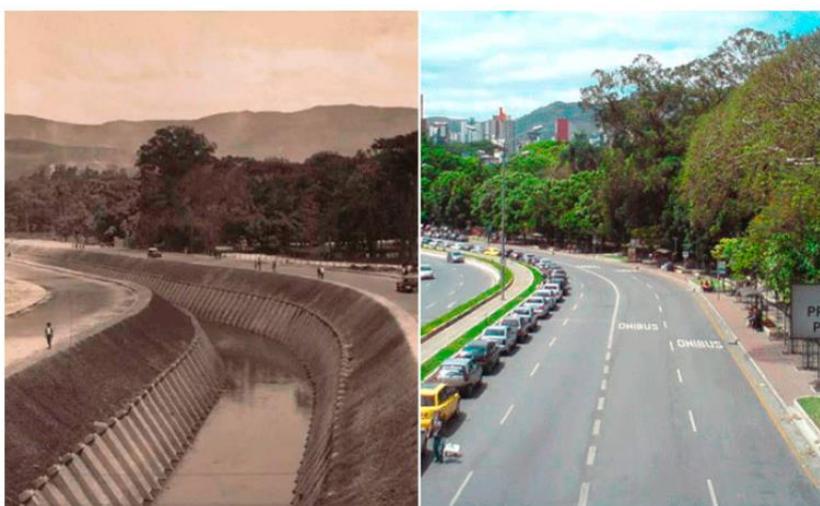
eram dispostos inadequadamente nas ruas e a saúde pública configurava-se como um enorme desafio.

Contudo, a visão higienista ainda se encontra fortemente presente na forma de pensar, planejar e agir daqueles que são responsáveis pela gestão das águas pluviais na maioria dos municípios brasileiros. Ainda que o cenário das cidades tenha mudado significativamente em comparação àquele do fim do século XIX e início do século XX, a drenagem urbana pouco se alterou, demonstrando dificuldades cada vez maiores em solucionar os problemas da modernidade.

Na drenagem tradicional, ocorre a impermeabilização das superfícies, resultando no aumento do escoamento superficial, e o aumento da velocidade de escoamento dos cursos d'água canalizados, criando um canhão hidráulico nos pontos a jusante da intervenção. Segundo Tominaga (2013), a continuidade da utilização das técnicas clássicas agrava as inundações e prejudica o desenvolvimento urbano.

Na figura 3.5, observa-se um trecho de curso d'água modificado pelo homem em duas situações, primeiramente canalizado e posteriormente tamponado, com a finalidade de liberar espaço para o alargamento de vias e favorecer a circulação de veículos:

Figura 3.5 – Ribeirão canalizado e tamponado em duas épocas distintas



Fonte – DomTotal (2020)

A situação representada na figura acima trata-se de uma situação típica do desenvolvimento urbano, em que os rios, córregos ou ribeirões têm seu curso natural modificado, a fim de

possibilitar a implantação de vias e favorecer a circulação de pedestres, ainda que em uma área sujeita a inundações.

A falta de planejamento e controle adequado da ocupação urbana torna o emprego das técnicas tradicionais inviáveis devido ao excesso de escoamento no sistema de drenagem, sendo que investimentos adicionais são recorrentes e insustentáveis, gerando transtornos para o ambiente construído (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016). Por isso, é muito comum a necessidade de obras de aprimoramento do sistema de drenagem, em que são necessárias desapropriações e interferências no trânsito, prejudicando o dia-a-dia de pessoas que moram ou frequentam a região.

A incompatibilidade do sistema de drenagem com o desenvolvimento urbano acarreta em prejuízos econômicos, sociais e ambientais para as cidades. Segundo Tucci (2007), a canalização de córregos é uma prática generalizada, amplamente utilizada, mas que não soluciona o problema das inundações, apenas o transfere para jusante, e pode representar um custo 10 vezes maior que o das medidas mais sustentáveis.

Sendo o problema apenas transferido para outros pontos da bacia, sempre haverá a necessidade de intervenções, resultando em gastos públicos cada vez maiores. Baptista, Nascimento e Barraud (2005) destacam também como limites das soluções clássicas de drenagem urbana: a falsa ideia de segurança na população, a qual passa a ocupar áreas ribeirinhas acreditando que não há mais riscos; a não contemplação dos problemas de qualidade da água; e a condução a problemas irreversíveis, limitando outros usos da água no meio urbano.

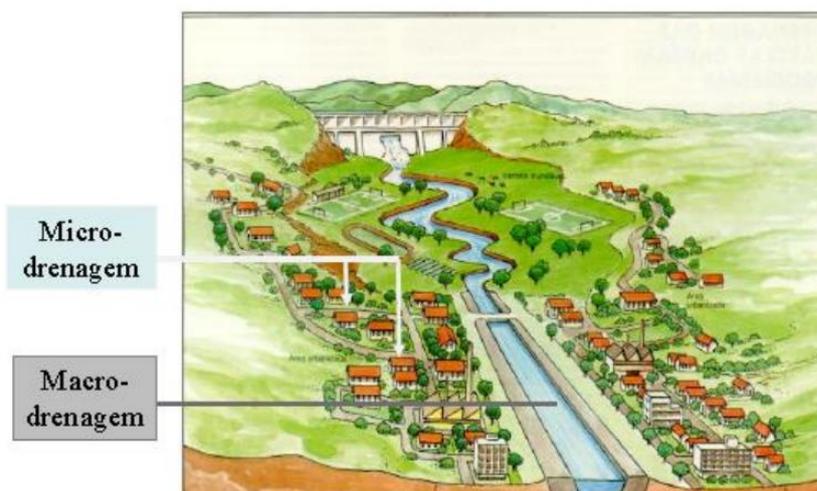
Os sistemas de drenagem urbana se dividem em microdrenagem e macrodrenagem. De acordo com Miguez, Veról e Rezende (2016), a microdrenagem é definida como: um sistema de condutos a nível de loteamento ou rede primária urbana, construído localmente para a captação distribuída dos escoamentos superficiais gerados pelas áreas urbanizadas e destinado a receber e conduzir as águas das chuvas de construções, lotes, ruas, praças, etc. O caminho da microdrenagem é definido pelo traçado das ruas e composto por pavimentos, sarjetas, sarjetões, bocas de lobo, galerias e canais de pequenas dimensões.

Ainda conforme Miguez, Veról e Rezende (2016), a macrodrenagem é definida como: rede de maior porte, que recebe águas concentradas. Os primeiros componentes da macrodrenagem são os próprios caminhos da drenagem natural anteriores à urbanização, como rios e córregos,

localizados nos talvegues dos vales. A rede de macrodrenagem recebe obras que modificam e complementam os caminhos naturais, como canais, galerias de maior dimensão, barragens, diques, etc. É a principal condutora de vazão de uma bacia, recebendo as contribuições do sistema de macrodrenagem e lançando-as no corpo receptor final.

A figura 3.6 possibilita uma visualização geral da localização de ambos os níveis de drenagem em uma bacia urbanizada:

Figura 3.6 – Disposição da microdrenagem e da macrodrenagem numa bacia



Fonte – Guedes (2019)

Tucci (2007) classifica as inundações urbanas em: inundações de áreas ribeirinhas, em razão da variabilidade espacial e temporal da precipitação e do escoamento na bacia; e inundações devido à urbanização, em razão da impermeabilização do solo, canalização e obstruções ao escoamento.

Segundo Miguez, Veról e Rezende (2016), as cheias urbanas estão diretamente relacionadas às falhas nas redes de micro e macrodrenagem, sejam por erro de concepção, falha na previsão do horizonte de projeto, falta de manutenção, envelhecimento do sistema ou obsolescência devido ao crescimento urbano.

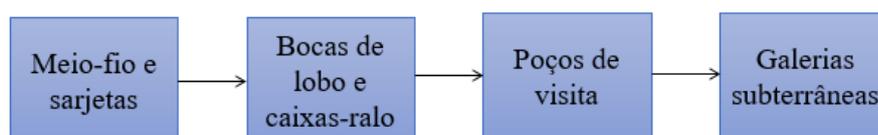
Ainda conforme Miguez, Veról e Rezende (2016), falhas na microdrenagem causam alagamentos superficiais espalhados pela bacia, falhas na macrodrenagem criam manchas de alagamento maiores e mais homogêneas, a partir do extravasamento da rede, e a conjugação de falhas gera alagamentos generalizados.

3.3.1 Projeto de Microdrenagem

Um projeto de drenagem pode envolver tanto o dimensionamento da micro quanto da macrodrenagem, dependendo do objeto de estudo. Como este trabalho atua essencialmente sobre a rede de microdrenagem de um bairro, serão revisados apenas os aspectos relativos a ela. Segundo Miguez, Veról e Rezende (2016), o projeto de microdrenagem é composto por três etapas: a definição dos elementos da rede; o traçado da rede; e o dimensionamento hidráulico.

A figura 3.7 é um fluxograma que indica a sequência simplificada dos elementos da microdrenagem na rede pública, sendo o caminho que a água percorre desde a precipitação na bacia de contribuição até a saída para a rede de macrodrenagem:

Figura 3.7 – Fluxograma da sequência de elementos da microdrenagem

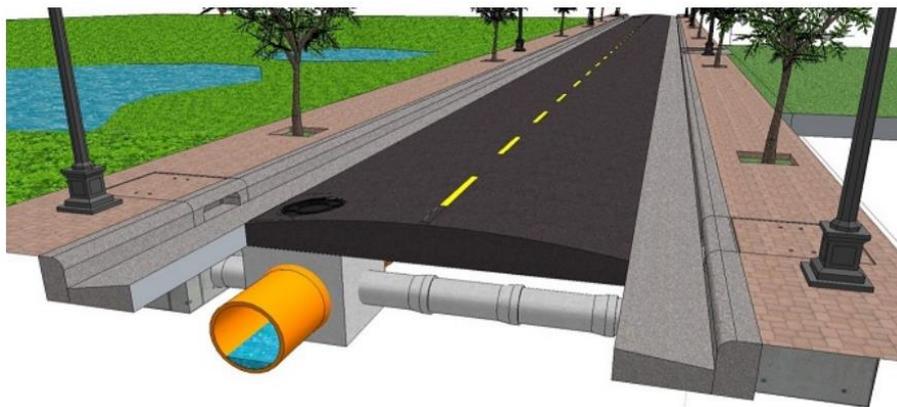


Fonte – Aatoria Própria (2021)

Sarjetas são canais de pequenas dimensões localizados entre o meio-fio e as pistas, responsáveis pela coleta e condução do escoamento superficial às bocas de lobo. Bocas de lobo são os elementos responsáveis pela captação do escoamento das sarjetas e direcionamento para as galerias subterrâneas. Em geral, essa conexão é realizada através de poços de visita, elementos que também permitem a inspeção e a manutenção da rede, bem como mudanças de seção transversal, declividade e direção das galerias. Já as galerias, conduzem as vazões para a destinação final relativa à macrodrenagem (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Na figura 3.8 abaixo, pode-se perceber a disposição dos elementos descritos anteriormente nos logradouros públicos, desde aqueles visíveis aos transeuntes, como as sarjetas e a entrada das bocas de lobo, àqueles localizados sob a superfície, como o interior dos poços de visita e as galerias. Ressalta-se que as próprias vias são também um elemento constituinte da drenagem urbana, já que são projetadas para direcionar o escoamento superficial para as sarjetas.

Figura 3.8 – Representação do sistema de microdrenagem de uma via pública



Fonte – Moraes (2015)

Os métodos e técnicas de dimensionamento para cada elemento citado podem ser facilmente encontrados em livros, cadernos de encargos e manuais de drenagem urbana, recomenda-se por exemplo aqueles elaborados pela Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP), do município de Belo Horizonte, ou pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA), de Curitiba. Cada município pode exigir valores mínimos específicos para determinadas dimensões a depender de suas peculiaridades locais, não sendo a intenção deste tópico descrever minuciosamente tais valores e equações, por não serem diretamente utilizados no decorrer deste trabalho. Acredita-se que o principal ponto a destacar aqui sejam as etapas do dimensionamento hidráulico da rede de microdrenagem, que, conforme Miguez, Veról e Rezende (2016), seguem os passos:

1. Traçado da rede em planta;
2. Definição do tempo de retorno (TR) da chuva de projeto;
3. Escolha da equação intensidade-duração-frequência (IDF) aplicável à região;
4. Definição das áreas de contribuição de cada seção de cálculo;
5. Determinação do coeficiente de escoamento (C) médio de cada seção de cálculo;
6. Determinação do tempo de concentração (t_c);
7. Cálculo da intensidade média de precipitação;
8. Cálculo da vazão de projeto do trecho pelo método racional;
9. Definição do diâmetro e da declividade do trecho de galeria;
10. Determinação do tempo de percurso (t_p) ao longo do trecho;
11. Adição do tempo de percurso ao tempo de concentração calculado na etapa 6;
12. Repetição dos passos de cálculo, a partir da etapa 5, para todos os trechos.

O mais comum é a utilização de planilhas eletrônicas para a execução desses cálculos. A figura 3.9 é um exemplo de planilha de dimensionamento hidráulico retirada do Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre:

Figura 3.9 – Planilha típica do cálculo hidráulico da rede de microdrenagem

Trecho (PV)	L (m)	Áreas (ha) trecho acum.		tc (min)	Q (l/s)	D (m)	S (m/m)	y/D (%)	V m/s	te (min)	Cotas do terreno (m)		Cotas do greide (m)		Profund. (m)	
		mont	jus								mont	jus	mont	jus		
1 - 2	50	0,30	0,30	10	67,0	0,3	0,014	57,5	1,58	0,53	99,50	98,80	98,50	97,80	1,00	1,00
2 - 3	40	0,27	0,57	10,53	125,0	0,4	0,0075	64,5	1,46	0,46	98,80	98,50	97,80	97,50	1,00	1,00
3 - 5	40	0,05	0,62	10,99												
4 - 5	50	0,30	0,30													
5 - 6	40	0,25	1,17													
6 - 8	40	0,05	1,22													
7 - 8	50	0,30	0,30													
8 - 9	40	0,25	1,77													
9 - 11	40	0,05	1,82													
10 - 11	50	0,30	0,30													
11 - 12	50	0,25	2,37													

Fonte – Tucci (2005)

3.4 Sustentabilidade na Drenagem Urbana

A partir da década de 1970, surgiram as técnicas alternativas ou compensatórias em drenagem urbana, as quais possuem como principal objetivo neutralizar os efeitos da urbanização, beneficiando a qualidade de vida e o meio ambiente nas cidades (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005). Naquela época, a sustentabilidade ganhava força em razão dos movimentos ambientalistas e conferências internacionais voltadas à temática. Assim, diante dos problemas oriundos das técnicas tradicionais de drenagem urbana, verificou-se a necessidade de um novo modelo de gestão das águas urbanas.

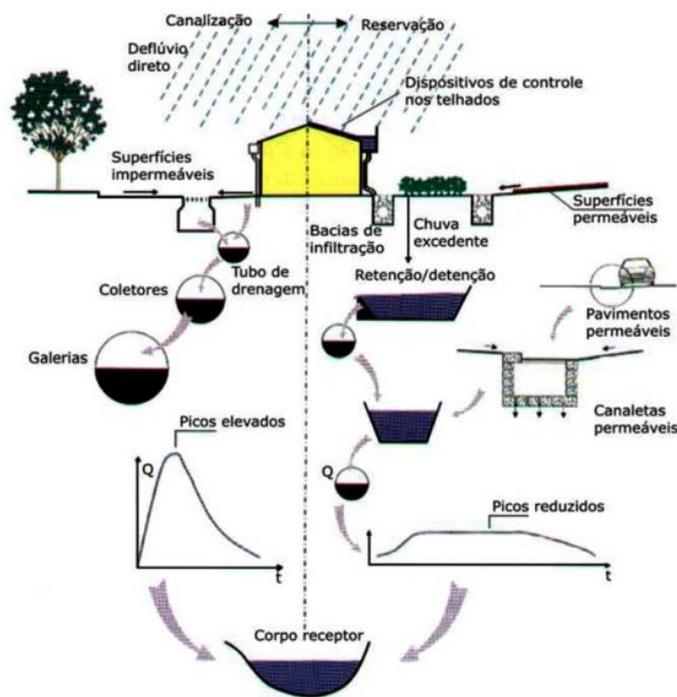
A nova abordagem integrou as águas pluviais ao tratamento do espaço urbano, através de um manejo sustentável (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016). A drenagem urbana sustentável busca promover benefícios sociais, econômicos e ambientais para o meio em que se insere. Segundo Cruz, Souza e Tucci (2007), sistemas de drenagem sustentáveis minimizam a perturbação dos processos naturais e as necessidades de ampliação de sua infraestrutura.

Conforme Miguez, Veról e Rezende (2016), a tendência atual é a busca por soluções sistêmicas para a bacia, por meio de intervenções distribuídas, em que se objetiva resgatar padrões de escoamento próximos àqueles anteriores ao processo de urbanização. Essa é a principal diferença para o modelo anterior, no qual o padrão natural era modificado para se adaptar ao crescimento urbano, através da concentração do fluxo e do aumento do escoamento superficial.

As técnicas compensatórias baseiam-se, essencialmente, na retenção e na infiltração das águas precipitadas (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005).

Na figura 3.10, verifica-se um esquema comparativo das principais diferenças entre os sistemas de drenagem baseados em canalização (tradicional) e reservação/infiltração (alternativo), com a indicação dos elementos na rede, níveis d'água escoados e hidrogramas de saída da bacia.

Figura 3.10 – Comparação dos sistemas de drenagem clássico e alternativo



Fonte – Canholi (2005 apud BENINI, 2015, p. 79)

O lado esquerdo da figura representa a drenagem tradicional, enquanto o lado direito representa a drenagem com o uso de técnicas compensatórias. As setas indicam o caminho que a água percorre desde os lotes até o corpo receptor. O esquema propõe o emprego de diferentes técnicas ao longo do percurso como um complemento ao sistema clássico (representado por tubos, coletores e galerias), sendo possível visualizar como essa prática contribui para a redução do volume escoado e o amortecimento da vazão de pico. Assim, pode-se chegar inclusive em benefícios econômicos pela diminuição do diâmetro das galerias.

Surgidos nos países desenvolvidos, esses sistemas receberam diferentes nomenclaturas, como: *Low Impact Development - LID*, nos Estados Unidos; *Water Sensitive Urban Design - WSUD*, na Austrália; e *Sustainable Drainage Systems - SUDS*, na Inglaterra (SOUZA; CRUZ; TUCCI, 2012). No Brasil, são conhecidos como técnicas compensatórias em drenagem urbana.

Segundo Tavanti e Barbassa (2012), o planejamento com *Low Impact Development* ocorre através de práticas integradas e estratégias de projeto que incluem retenção e/ou detenção, controle e captura de poluentes, recarga subterrânea, valorização estética da propriedade e uso múltiplo das áreas.

As técnicas compensatórias encontram-se em expansão, evidentemente em maior escala nos países desenvolvidos, mas já podendo ser verificadas em algumas cidades brasileiras. Pesquisas vêm sendo realizadas e alguns municípios têm adotado seus princípios como norteadores de políticas públicas. O meio acadêmico demonstra maior interesse nas técnicas compensatórias, dada sua proximidade com atividades de pesquisa e facilidade em adotar inovações. O meio técnico-profissional demonstra maior resistência, dados os anos de experiência acumulados em obras clássicas, como canalização, diques e barragens (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016).

Essa diferença é natural e o mais importante é que ambos os meios caminhem na mesma direção, ainda que em ritmos diferentes. Dificuldades sempre existirão, principalmente em países em desenvolvimento e que não dão o devido valor à pesquisa e inovação, como o Brasil.

As técnicas compensatórias podem ser classificadas em não estruturais ou estruturais. Medidas não estruturais atuam a favor de uma convivência mais harmônica das pessoas com os rios e suas cheias naturais. São exemplos a preservação ambiental, a disposição adequada dos resíduos, a construção de mapas de inundação e o zoneamento urbano (MIGUEZ; VERÓL; REZENDE, 2016). Destacam-se também os procedimentos de retardamento dos escoamentos, como a adoção de revestimentos de canais e pavimentos mais rugosos, a racionalização do uso e ocupação do solo, a exigência regulamentar de medidas de controle na fonte, a sensibilização da população e a educação ambiental (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005).

Conforme Miguez, Veról e Rezende (2016), medidas estruturais envolvem obras hidráulicas e atuam diretamente na capacidade de descarga da rede de drenagem, modificando as relações entre o ambiente construído e a geração de escoamento. Elas atuam reduzindo a vazão de pico e/ou o volume, modificando o hidrograma da bacia. Dentre as medidas estruturais, há uma diferenciação quanto ao princípio de funcionamento. Assim, existem técnicas de infiltração e de detenção, podendo haver a combinação de ambas em um mesmo dispositivo (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005).

São exemplos de técnicas compensatórias estruturais as bacias de detenção ou retenção, os jardins de chuva, os microrreservatórios individuais, os pavimentos permeáveis, os poços de infiltração, os telhados verdes, as trincheiras de infiltração e as valas/valetas e planos de infiltração. Algumas serão detalhadas a seguir.

3.4.1 *Jardins de Chuva*

Jardim de chuva é uma técnica de controle do escoamento na fonte baseada nos conceitos de biorretenção e compensação de áreas impermeáveis (MELO et al., 2014). Além de armazenar e infiltrar as águas oriundas do escoamento superficial, contribuem para a melhoria da qualidade da água ao reter parte dos poluentes nela presentes, o que preserva o lençol freático de possíveis contaminações. Segundo Tominaga (2013), tais poluentes são removidos por processos de adsorção, filtração, volatilização, troca de íons e decomposição. Conforme Melo et al. (2014), os principais poluentes removidos pelos jardins de chuva são sólidos suspensos totais, nitratos, fósforo total, zinco e metais pesados.

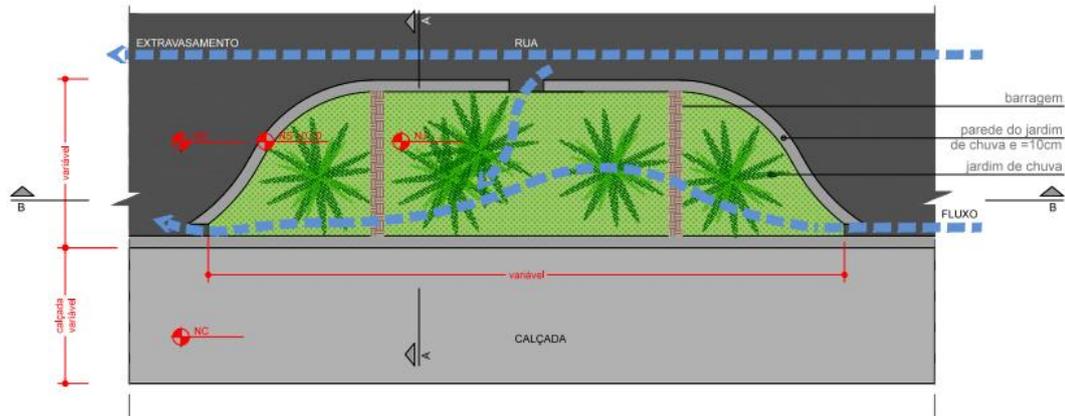
As figuras 3.11 e 3.12 demonstram um jardim de chuva piloto implantado em via pública na cidade de Belo Horizonte pela prefeitura e um desenho técnico de jardim de chuva em planta, respectivamente:

Figura 3.11 – Jardim de chuva em via pública



Fonte – PBH (2021)

Figura 3.12 – Representação de jardim de chuva em planta



Fonte – Soluções para Cidades (2013)

Reis e Ilha (2014) descrevem jardins de chuva como uma solução simples, composta por áreas permeáveis rebaixadas em nível inferior ao terreno natural, preenchidas por material granular e plantas, as quais recebem as águas precipitadas sobre uma área impermeável. Um detalhe construtivo importante é a instalação de extravasores conectados à rede de drenagem, para quando a capacidade de infiltração e o limite de armazenamento do dispositivo forem superados. Reis e Ilha (2014) sugerem a instalação de um extravasor com crivo direcionando o fluxo até um reservatório, a fim de permitir a reutilização da água para fins não potáveis.

Tais jardins podem ser implantados em locais adjacentes a estacionamentos, vias públicas, áreas residenciais ou comerciais. Ainda, são indicados para áreas adensadas e pequenas (com contribuição de até 2 hectares), pois a utilização em áreas maiores aumenta as chances de colmatação (TOMINAGA, 2013). A colmatação é a principal causa da diminuição da capacidade de infiltração desses sistemas, comprometendo a eficiência e a vida útil deles (LUCAS et al., 2015). Por isso, é essencial tomar os devidos cuidados no momento de instalação do dispositivo e realizar manutenções periódicas, a fim de evitar o entupimento precoce.

3.4.2 Microrreservatórios Individuais

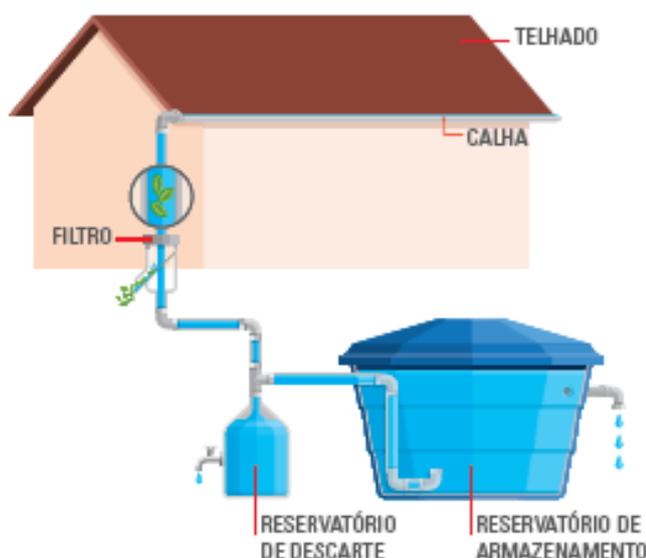
Microrreservatórios têm como principal função promover o amortecimento da vazão de pico através da retenção de parte do escoamento e posterior liberação gradual na rede pública de drenagem, quando o volume máximo do dispositivo é superado. Possibilitam, ainda, o reuso da água armazenada pelo proprietário do lote, sendo recomendados pela literatura fins não

potáveis, como irrigação de jardins, lavagem de pisos e carros ou descarga em vasos sanitários, já que a água da chuva sem tratamento é imprópria para consumo humano.

Segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2005), microrreservatórios são tanques pré-fabricados ou estruturas em alvenaria ou concreto, que podem ser instalados enterrados ou a céu aberto e recebem águas pluviais de superfícies impermeáveis, principalmente telhados. Cabe destacar que o custo de instalação de reservatórios enterrados é maior. Ainda, é importante atentar-se à manutenção do dispositivo e evitar o acúmulo de água parada, o que poderia levar à proliferação de vetores de doenças endêmicas, como a dengue.

Microrreservatórios podem ser utilizados apenas para a retenção de determinados volumes, diminuindo o pico da vazão, muitas vezes chamados de caixas de captação, mas é ainda mais interessante a concepção de um sistema completo para o aproveitamento da água da chuva, como citado anteriormente. Por isso, a figura 3.13 permite a visualização desse sistema, com todos os elementos necessários, como calha, filtro, reservatório de separação de primeiras águas e reservatório de armazenamento:

Figura 3.13 – Esquema de captação de água de chuva em uma residência



Fonte – IPT (2015 apud FEAM, 2016)

A água que cai sobre o telhado é conduzida através da calha para um filtro, o qual remove os sólidos mais grosseiros. Em seguida, o reservatório de descarte recebe as primeiras águas, aquelas que carregam a maior quantidade de poluentes do telhado, parcela que não deve ser aproveitada devido ao elevado teor de contaminantes. Por fim, o restante da água é conduzido

para o reservatório de armazenamento, onde pode ser utilizado para fins não potáveis, como já mencionado.

De maneira geral, microrreservatórios podem ser instalados em lotes residenciais e comerciais ou junto do sistema de microdrenagem (ABCP, 2013). No primeiro caso, é fundamental a colaboração dos proprietários do lote, já que esses arcarão com os custos de implantação e manutenção do dispositivo, o que pode levar a uma menor aceitação em comparação ao segundo caso. Medidas não estruturais podem ser tomadas para incentivar o uso de reservatórios em terrenos particulares, como exigências legais ou redução no Imposto Predial e Territorial Urbano – IPTU.

O dimensionamento de microrreservatórios é função de uma vazão limite de saída e de um volume de reservação, limitado pelas cotas do terreno e da rede de drenagem (KIPPER, 2015). A área disponível é um fator limitante, principalmente para a implantação do dispositivo em residências já consolidadas. Em novos loteamentos, sua instalação pode ser considerada mais facilmente, pois necessita de um pequeno espaço em relação à área total do terreno.

Tais reservatórios são apropriados para bacias pequenas e baixos tempos de retorno (ABCP, 2013). Seu uso disseminado na bacia diminui a necessidade de obras nas redes de micro e macrodrenagem. De acordo com Hentges e Tassi (2012), foram verificadas reduções significativas nas vazões escoadas e nos diâmetros no dimensionamento da rede de drenagem com o emprego de microrreservatórios nos lotes de uma bacia hipotética.

3.4.3 Poços de Infiltração

Poços de infiltração são dispositivos que melhoram a capacidade de infiltração do terreno, atuando também como reservatórios quando a taxa de infiltração no solo é menor que a taxa de entrada de água no poço, ou quando o solo se encontra saturado. Contribuem também para a melhoria da qualidade das águas, diminuindo a carga de poluentes presentes na água a ser infiltrada ou liberada na rede de drenagem (REIS; OLIVEIRA; SALES, 2008). É possível perceber como esse dispositivo contribui para a resolução de diferentes problemas relacionados às águas urbanas, de quantidade e qualidade.

Segundo Baptista, Nascimento e Barraud (2005), os poços permitem reduzir as vazões de pico e os volumes de água que vão para as galerias pluviais, além de possibilitarem uma boa integração ao ambiente, podendo seus materiais de superfície serem utilizados em harmonia

com o paisagismo da área. A figura 3.14 a seguir representa uma área de lazer infantil, na região de Lyon, na França, onde pode-se verificar a presença de um poço de infiltração ao centro do pátio:

Figura 3.14 – Poço de infiltração em uma área de lazer infantil, na França

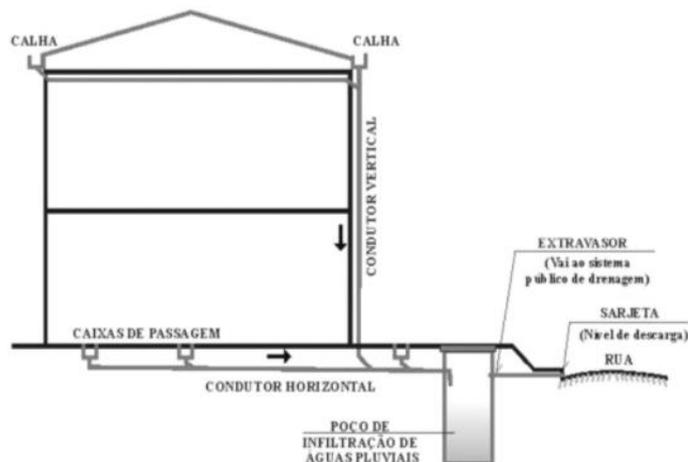


Fonte – Baptista, Nascimento e Barraud (2005)

Conforme Reis e Ilha (2014), poços de infiltração são bastante utilizados em algumas regiões do Brasil, porém os autores não citam quais. Os autores ainda definem esse dispositivo como “uma escavação no solo revestida por tubos de concreto perfurados ou tijolo assentado em crivo, com lateral e fundo preenchidos por brita envolta em geotêxtil”.

Na figura 3.15, pode-se observar um modelo de implantação de poço de infiltração em uma residência, com os elementos necessários para sua instalação representados, como calha, condutores e extravasores:

Figura 3.15 – Modelo de implantação de poço de infiltração



Fonte – Reis, Oliveira e Sales (2008)

Segundo Tominaga (2013), tais poços possuem ótima capacidade de integração ao meio ambiente urbano, por ocuparem pequenos espaços e serem bem discretos. De fato, por serem estruturas enterradas no solo, podem facilmente passar despercebidos no ambiente.

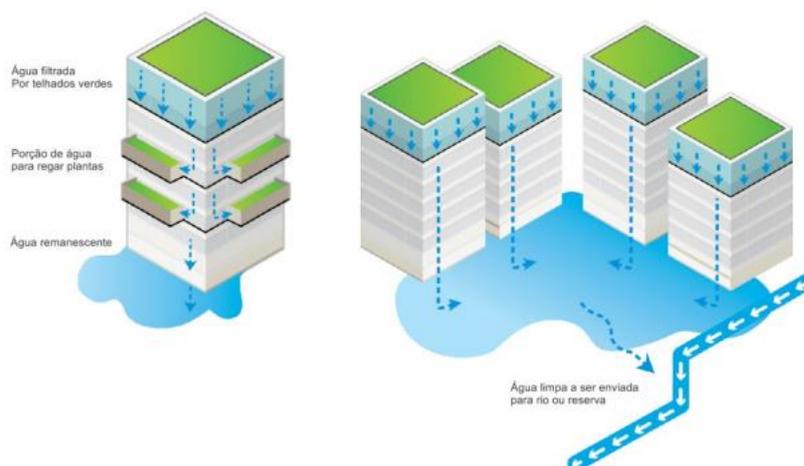
3.4.4 Telhados Verdes

A construção de edificações é um fator relevante na impermeabilização do solo (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2005). Os telhados representam uma boa parte da área impermeabilizada das cidades. Então, telhados verdes têm sido uma boa solução para minimizar alguns problemas ambientais tipicamente urbanos. Segundo Borges, Aguiar e Zampieri (2019), com o crescente desenvolvimento da malha urbana, as áreas verdes têm se tornado cada vez mais escassas. Essa afirmação reforça a necessidade de se encontrarem alternativas de compensação à diminuição da vegetação.

Telhados verdes contribuem para o aumento das parcelas retenção e evapotranspiração do ciclo hidrológico, atuando tanto no amortecimento da vazão de pico quanto na redução do volume de água conduzido para a rede de drenagem. Além desses benefícios, contribuem também para a melhoria do microclima, reduzindo as ilhas de calor e proporcionando maior conforto térmico. Esses dispositivos têm sido uma boa solução para problemas relacionados à drenagem e energia (LEITE; FUJIMURA; FERNANDES, 2016). O último, devido à economia com aparelhos de ar-condicionado. Ainda, destaca-se a função estética proporcionada pelos telhados verdes.

Na figura 3.16, tem-se uma representação da utilização de telhados verdes, destacando-se algumas de suas funções no ambiente urbano, como retenção e filtração de poluentes.

Figura 3.16 – Funções dos telhados verdes no ambiente urbano



Fonte – Singapore (2011 apud BENINI, 2015, p. 127)

Telhados verdes transformam a superfície de um telhado convencional em um espaço multifuncional, com o uso da vegetação (TASSI et al., 2013). Eles podem ser classificados em extensivos ou intensivos, sendo que em algumas referências se encontra também a classe semi-intensivos, como um meio-termo entre as anteriores.

Segundo Tassi et al. (2013), telhados verdes extensivos são caracterizados pela pouca profundidade de solo e pelo uso de espécies menores, como vegetação rasteira, sendo que a irrigação se faz necessária apenas em situações extremas. Já os intensivos são caracterizados pela maior profundidade de solo e pelo uso de plantas de maior porte. É fácil deduzir que os primeiros terão um custo menor quando comparados aos segundos, devido à menor necessidade de manutenção, materiais e exigências das estruturas da edificação.

Conforme Baptista, Nascimento e Barraud (2005), é mais simples a implantação de telhados verdes em edificações novas, já projetadas com esse propósito, mas também é possível sua instalação em edificações existentes, desde que se verifique a estabilidade estrutural e as conformidades com as normas técnicas.

3.4.5 Pavimentos Permeáveis

Nas cidades, os principais meios de transporte, sejam eles individuais ou coletivos, como carros, motos, ônibus e até mesmo bicicletas, dependem da existência de ruas e avenidas. Assim, a pavimentação das vias de tráfego é de grande importância para a circulação de pessoas e mercadorias pelo ambiente urbano. Em regiões densamente ocupadas, os espaços destinados ao sistema viário e a estacionamentos representam uma grande parte da bacia de drenagem

(TOMINAGA, 2013). Segundo Parra e Teixeira (2020), aproximadamente 20% da área impermeabilizada de uma cidade é destinada às vias de circulação de pedestres e veículos, conferindo a essas áreas papel importante na ocorrência de eventos de enchentes.

É usual a utilização de pavimentação impermeável, como o asfalto tradicional, pois essa garante boa estabilidade ao solo. Conforme Silva (2019), a umidade pode provocar redução da capacidade de carga do solo que sustenta o pavimento. Por isso, essa técnica (impermeabilização) foi adotada ao longo dos anos e hoje é comum tanto em vias de maior tráfego quanto em vias menos movimentadas.

Conseqüentemente, com a impermeabilização de uma parcela significativa da bacia, ocorre a diminuição da infiltração das águas precipitadas e a elevação do escoamento superficial. Diante disso, o uso de pavimentos permeáveis em determinadas situações pode vir a ser uma solução eficiente. De acordo com Junior e Barbassa (2006), pavimentos permeáveis são superfícies porosas ou perfuradas que permitem a infiltração de parte do escoamento superficial.

Sabe-se que o aumento da intensidade e frequência dos eventos de chuva, consequência das mudanças climáticas, se configurarão como um desafio aos projetos de drenagem urbana, por resultarem no aumento da frequência e volume dos escoamentos (FILENI; COSTA; ALVES, 2019). Dentre as várias técnicas compensatórias disponíveis, destaca-se os pavimentos permeáveis como a renovação mais benéfica para atenuação de enchentes (CHUI; LIU; ZHAN, 2016; HU et al., 2017 apud FILENI; COSTA; ALVES, 2019). Esses dispositivos serão melhor detalhados nos tópicos que se seguem.

3.4.5.1 Conceitos e Definições

De acordo com Miguez, Veról e Rezende (2016), revestimentos permeáveis podem ser utilizados em calçadas, estacionamentos, quadras esportivas e no interior dos lotes. Segundo Tucci (2007), em ruas de trânsito intenso podem sofrer deformação e entupimento, tornando-se impermeáveis e perdendo sua função principal. Concordando com esses autores, Becker e Pinheiro (2019) afirmam que a técnica se apresenta como principal aplicação em calçadas, parques e ruas com tráfego leve.

Já Certu (1998 apud Tominaga, 2013), expõe em seu trabalho boas experiências francesas em que a técnica se mostrou eficiente inclusive em vias de maior tráfego. Cabe destacar que a

França é o país pioneiro na utilização de pavimentos permeáveis, entre 1945 e 1950, porém as limitações tecnológicas da época prejudicaram seu maior sucesso (SILVA, 2019).

São vantagens da utilização de pavimentos permeáveis a recarga do lençol freático, a melhoria da qualidade das águas infiltradas ou encaminhadas para a rede de drenagem, a redução do escoamento superficial, o controle da erosão do solo e os custos similares ao pavimento convencional (PINTO, 2011). Destaca-se também a detenção temporária das águas e o rearranjo do hidrograma, a redução de poças no sistema viário e a não necessidade de espaços físicos específicos (TOMINAGA, 2013).

Ainda, pavimentos permeáveis podem prolongar a vida útil das infraestruturas de drenagem e evitar a necessidade de futuros investimentos (FILENI; COSTA; ALVES, 2019). Assim, é fácil perceber a multiplicidade de questões que, de uma forma ou de outra, beneficiam-se com o uso da técnica, que vão desde os aspectos ambientais e sociais até à própria segurança no trânsito, ao diminuir o risco de acidentes por aquaplanagem.

Segundo Miguez, Veról e Rezende (2016), a técnica é limitada pelo nível do lençol freático, pelo tipo de solo e pela necessidade de manutenção. Existe o risco de contaminação do lençol freático em situações em que o mesmo seja muito próximo da superfície, bem como o risco de pouca ou nula infiltração para solos com baixa condutividade hidráulica. Sobre isso, pavimentos permeáveis são viáveis para solos com taxa de infiltração superior a 7 mm/h e com percentual inferior a 30% de argila ou 40% de silte e argila combinados (ARAÚJO; TUCCI; GOLDENFUM, 2000).

A manutenção é muito importante para prevenir a colmatação (entupimento) do pavimento, garantindo sua eficiência. Tal manutenção pode ser realizada por meio de um sistema de limpeza do pavimento a vácuo, em que é possível recuperar mais de 95% da capacidade inicial de condutividade hidráulica (BATEZINI, 2013). A necessidade de mão de obra qualificada para prevenir a obstrução prematura do pavimento pode ser considerada uma desvantagem da técnica (PINTO, 2011).

Na figura 3.17, estão representados alguns dos principais pavimentos permeáveis utilizados atualmente, são eles: concreto poroso, asfalto poroso e piso intertravado com e sem vegetação:

Figura 3.17 – Exemplos de tipos de pavimentos permeáveis



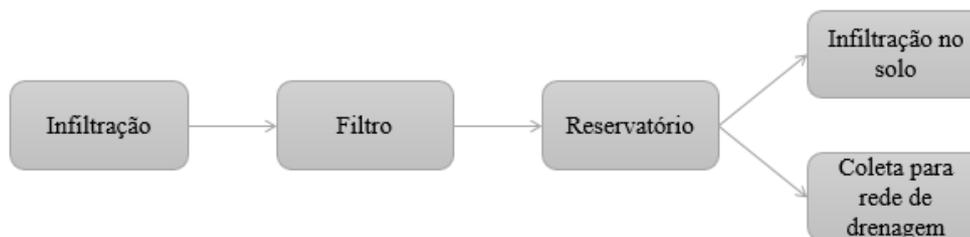
Fonte – Engenharia360 (2020)

Segundo Araújo (1999 apud Júnior e Barbassa, 2006), pavimentos permeáveis podem ser classificados em três grupos: concreto poroso; asfalto poroso; e blocos de concreto vazados preenchidos com material granular, como areia ou vegetação rasteira.

Pinto (2011) diferencia dois termos utilizados na literatura: pavimentos permeáveis e pavimentos porosos. Conforme o autor, em revestimentos permeáveis a infiltração da água ocorre por entre as juntas ou pelos vazios preenchidos com grama, areia ou brita, enquanto que em revestimentos porosos a água infiltra pelos próprios poros. Vale lembrar que o concreto e o asfalto porosos diferenciam-se do convencional pela remoção da fração fina dos agregados e da areia da mistura que os compõe, como será melhor detalhado posteriormente.

A figura 3.18 refere-se a um esquema simplificado da atuação do dispositivo, desde a infiltração da água na superfície do pavimento até a saída do dispositivo, que pode ocorrer por infiltração no solo ou direcionamento para a rede de drenagem:

Figura 3.18 – Esquema de funcionamento de pavimentos permeáveis



Fonte – Adaptado de Míguez, Veról e Rezende (2016)

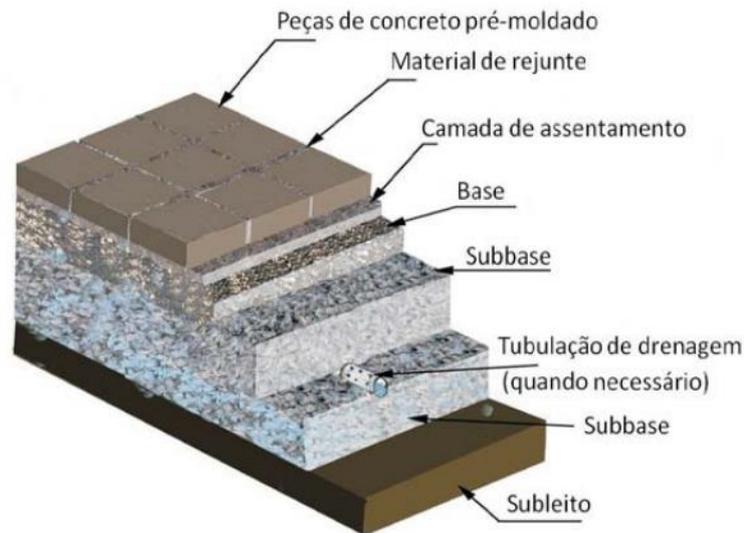
Como indica o esquema acima, a água precipitada infiltra no corpo do pavimento ou nos espaços entre blocos, como já citado. A percolação da água pelo interior do pavimento permite a retirada de boa parte das impurezas nela presentes, atuando como um filtro. A água é inicialmente reservada e pode ter como destinação final a infiltração no solo ou o direcionamento para a rede de drenagem, sendo possível a combinação de ambas.

Com relação à melhoria da qualidade da água, pavimentos permeáveis propiciam a purificação física, química e biológica da água. O concreto poroso, por exemplo, permite a ocorrência de atividade microbiana em seus poros, levando a degradação de determinados poluentes. Ainda, por possuir pH de natureza alcalina, o concreto, em contato com a água, promove a liberação de íons de hidróxido e carbonato, o que provoca a precipitação de contaminantes, além de elevar o pH ligeiramente ácido característico da água da chuva (BECKER e PINHEIRO, 2019).

De acordo com Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), a capa ou revestimento poroso deve ter espessura de 5 a 10 cm, o filtro de agregados (de 1,25 cm de diâmetro) deve ter espessura de 2,5 cm e a câmara ou reservatório de pedras (de 3,8 a 7,6 cm de diâmetro) terá espessura definida conforme o volume que se pretende armazenar.

A figura 3.19 permite a visualização das camadas que compõe um pavimento permeável de peças de concreto pré-moldado:

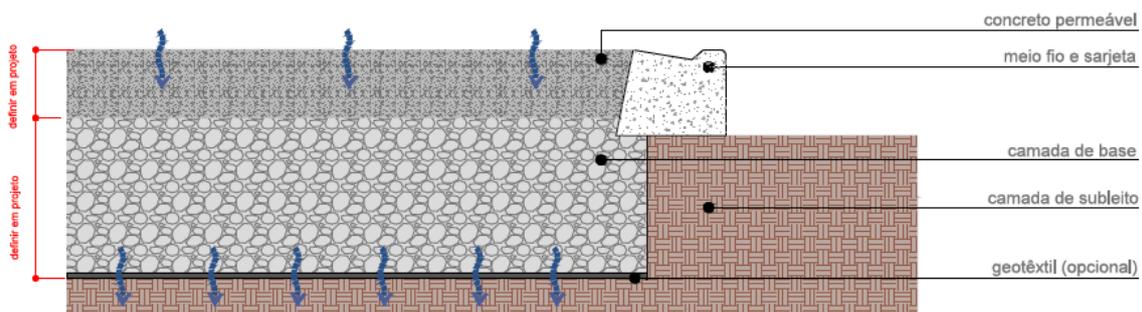
Figura 3.19 – Seção típica de pavimento permeável de concreto pré-moldado



Fonte – Soluções para Cidades (2020)

Já a figura 3.20 permite a visualização das camadas que compõe um pavimento de concreto permeável moldado no local, com infiltração total no solo:

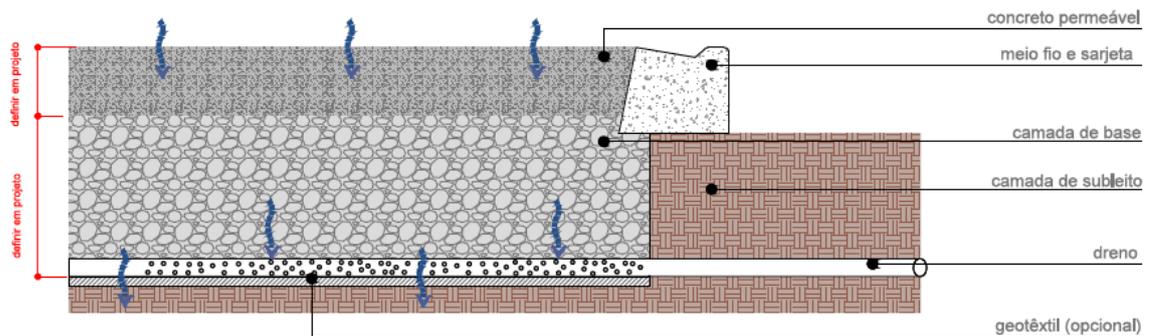
Figura 3.20 – Seção de pavimento de concreto permeável moldado no local de infiltração total



Fonte – ABCP (2013)

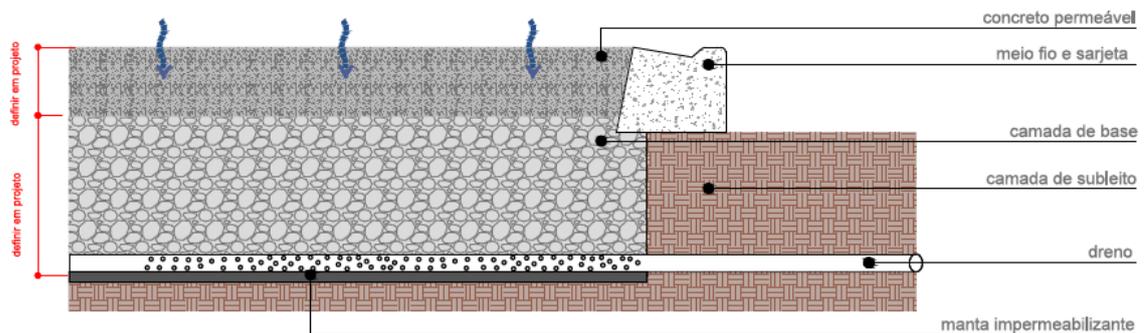
A figura anterior exibe um pavimento do tipo infiltração total, o qual é projetado para que toda a água que atinge sua bacia de contribuição seja infiltrada, dispensando outro exutório. Porém, vale destacar que existem mais dois tipos, o de infiltração parcial e o sem infiltração. Ambos contam com a presença de uma tubulação em seu interior para a condução parcial ou total da água armazenada. O último tipo é indicado para regiões em que a condutividade hidráulica do solo seja baixa, condição típica de solos muito argilosos. As figuras 3.21 e 3.22 abaixo ilustram tais situações:

Figura 3.21 – Seção de pavimento de concreto permeável moldado no local de infiltração parcial



Fonte – ABCP (2013)

Figura 3.22 – Seção de pavimento de concreto permeável moldado no local sem infiltração



Fonte - ABCP (2013)

De maneira geral, um pavimento pode ser definido como um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semi espaço infinito, denominado subleito (MOTTA, 2019). A seção transversal típica de um pavimento conta com a fundação, o subleito e camadas com espessuras e materiais determinados através de métodos de dimensionamento (SENÇO, 2007 apud MOTTA, 2019).

Quanto à capacidade dos pavimentos permeáveis em propiciar a retenção de poluentes, Baptista, Nascimento e Barraud (2005) alertam para o fato de haverem poucos estudos brasileiros sobre o tema, mas os autores exibem alguns resultados encontrados na literatura internacional, para diferentes tipos de poluentes. A tabela 3.1 reproduz os valores de redução percentual para cada um desses estudos:

Tabela 3.1 – Percentual de remoção de poluição com o uso de pavimentos porosos

Fonte	Poluente				
	Sólidos suspensos	Demanda química de oxigênio	Zinco	Chumbo	Global
MWCG (1987)	82 – 95	82	99	-	-
Urbonas e Stahre (1993)	85 – 95	-	98	-	-
Azzout et al. (1994)	50 - 70	54 – 89	-	78 – 93	-
Butler e Davies (2000)	-	-	-	-	80 – 90
Daywater (2003)	36 - 81	48 – 79	35 - 77	76 - 86	-

Fonte – Baptista, Nascimento e Barraud (2005)

No geral, as reduções para os sólidos suspensos variaram de 36% a 95%, dependendo do autor, a demanda química de oxigênio teve redução de 48% a 89%, o zinco de 35% a 99% e o chumbo de 76% a 93%. A variação dos resultados entre trabalhos foi grande, o que provavelmente depende do tipo de pavimento e da metodologia considerada por cada autor. Mas, no geral, pode-se confirmar o potencial do dispositivo em melhorar a qualidade das águas precipitadas, quer sejam direcionadas para a rede de drenagem, quer sirvam de recarga para o lençol freático.

3.4.5.2 Estado da Arte

Concluída essa apresentação inicial da técnica, é importante oferecer um panorama geral do estado da arte, ou seja, do conhecimento atual acerca dos pavimentos permeáveis no meio científico, a partir de trabalhos de outros autores, destacando seus objetivos e os principais resultados encontrados por eles, a fim de dar suporte à escolha desse dispositivo para o presente estudo. Cabe mencionar que os trabalhos aqui selecionados não esgotam os conhecimentos sobre os pavimentos permeáveis, sendo apenas exemplos relevantes encontrados durante essa revisão bibliográfica.

Fileni, Costa e Alves (2019) realizaram um estudo através de simulação computacional em que pavimentos permeáveis eram utilizados em conjunto com bacias de retenção em uma área urbana consolidada na região administrativa de Ceilândia, no Distrito Federal. Nesse estudo,

concluiu-se que os pavimentos permeáveis foram responsáveis pela redução em 22% do volume do escoamento, além de redução em 22% do número de bocas de lobo alagadas e 40% do volume total inundado da região. Simulações computacionais são ferramentas importantes que permitem a proposição de soluções, a análise de cenários e dão apoio às tomadas de decisões.

Motta (2019) realizou um estudo da substituição da pavimentação tradicional por pavimentos permeáveis em blocos de concreto porosos em vias urbanas de baixo fluxo de tráfego, em um bairro predominantemente residencial no município de Vila Velha, Espírito Santo. O autor analisou a influência do dispositivo sobre o dimensionamento e o comportamento da rede de drenagem local, além de avaliar os custos. Tal estudo teve como resultados a redução do comprimento da rede de drenagem, o maior distanciamento entre os elementos da rede e a redução dos diâmetros das galerias. Ainda, Motta (2019) verificou que o aumento no custo relacionado ao pavimento é compensado pela redução no custo relacionado à rede de drenagem.

Diversos estudos, além de Motta (2019), destacam a possibilidade de redução dos diâmetros das galerias como consequência do menor escoamento proporcionado pelos pavimentos permeáveis como uma grande vantagem, o que é verdade. Porém, vale a pena atentar-se para o fato de que os ganhos ambientais e sociais atrelados à menor probabilidade de alagamentos, resultante das maiores infiltrações, não devem ser anulados pela diminuição da capacidade de condução das vazões, resultante dos menores diâmetros, situação essa que tiraria a razão de ser da técnica, promovendo um retorno à estaca zero, por assim dizer.

No Brasil, a norma ABNT NBR 16416:2015 estabelece os requisitos mínimos exigíveis ao projeto, especificação, execução e manutenção de pavimentos permeáveis de concreto, construídos com revestimentos de peças de concreto intertravadas, placas de concreto ou pavimento de concreto moldado no local. Segundo Nigri (2017), com a ABNT NBR 16416:2015, a indústria da construção civil tem um grande auxílio e a engenharia brasileira ganha com a uniformização e facilitação em promover obras com pavimentos permeáveis, ocasionando no aumento da segurança para os construtores e a sociedade como um todo.

Faria et al. (2019) analisaram diferentes composições de concreto permeável e avaliaram os resultados obtidos para ensaios de resistência à compressão e permeabilidade. Eles estudaram as relações 1:3, 1:4 e 1:5 de cimento e brita e 1:1:4 de cimento, areia e brita, sendo que em todos os traços a relação água/cimento foi de 0,34. Os autores moldaram corpos de prova e placas de concreto de 400x400x80 mm para cada traço e utilizaram os seguintes materiais em suas

composições: cimento CPV ARI; brita de gnaiss classificada granulometricamente como brita 0; e areia comum de rio, para o traço 1:1:4. Para todos, o concreto foi produzido em betoneira, inserindo-se sequencialmente metade da água, cimento e brita, areia e o restante da água.

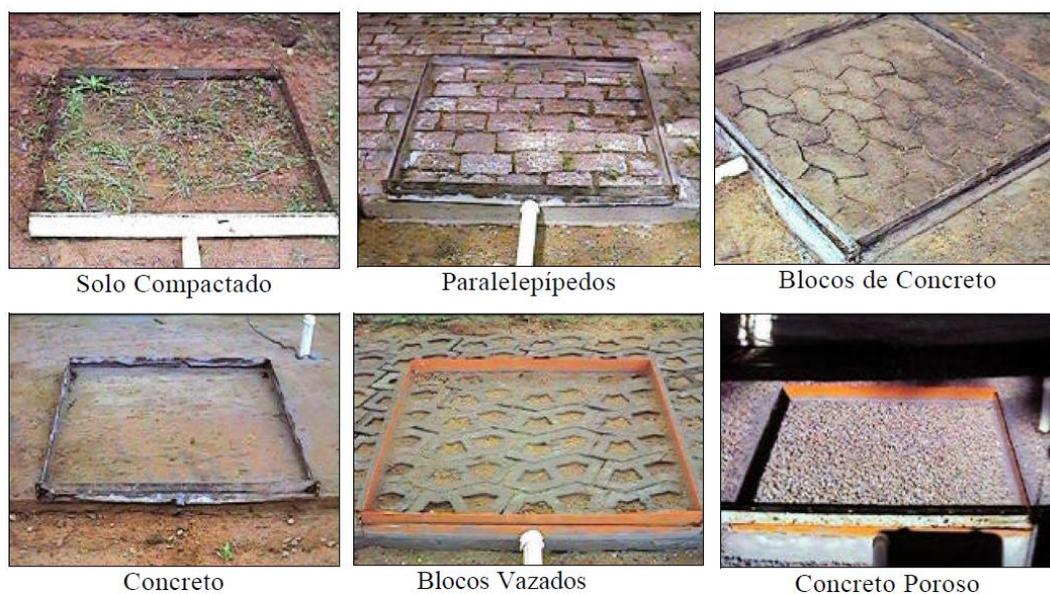
Ainda sobre esse estudo, Faria et al. (2019) concluíram que o traço 1:3, aquele com menor teor de agregados e maior teor de cimento, apresentou a maior resistência, enquanto o traço 1:5, com maior teor de agregados, apresentou a maior permeabilidade, em função do menor preenchimento dos vazios pela pasta de cimento. Outra importante conclusão foi de que os traços 1:3 e 1:1:4 atenderam as especificações para o concreto permeável da ABNT NBR 16416:2015, por apresentarem resistência mecânica superior a 20 MPa. O traço 1:5, apesar da melhor relação permeabilidade-resistência, não atendeu os critérios da norma para tráfego leve. Esperava-se um comportamento intermediário para o traço 1:4, o qual foi desconsiderado após problemas de concepção.

De maneira geral, é possível afirmar que a presença de agregado miúdo afeta a qualidade do concreto, aumentando a resistência e diminuindo a permeabilidade. Quanto aos maiores teores de cimento, as consequências são o aumento da resistência, diminuição da permeabilidade e elevação do custo, o que pode inviabilizar a produção do concreto. Por fim, o concreto permeável é uma excelente opção para minimizar os impactos ocasionados pelo crescimento urbano (FARIA et al., 2019).

Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) efetuaram experimentos com simulador de chuva para quatro tipos de cobertura existentes: terreno natural, superfícies impermeáveis, semipermeáveis e permeáveis. O objetivo desse estudo foi comparar a eficácia dos pavimentos permeáveis em relação às demais coberturas quanto à redução do escoamento superficial gerado por um determinado tipo de chuva.

Para isso, os autores realizaram ensaios com as seguintes superfícies: solo compactado, com declividade de 1% a 3%; concreto convencional de cimento, areia e brita, com declividade de 4%; paralelepípedos, com declividade de 4%; pedras de concreto industrializado do tipo “pavi S”, conhecidas como blocket, com declividade de 2%; blocos de concreto com orifícios preenchidos com areia e, por fim, concreto poroso, ambos com declividades de 2%. A figura 3.23, retirada do referido artigo, ilustra as superfícies mencionadas:

Figura 3.23 – Pavimentos estudados por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000)



Fonte - Araújo, Tucci e Goldenfum (2000)

Ainda sobre o trabalho de Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), foi utilizada uma chuva de projeto com duração de 10 min e tempo de retorno de 5 anos, resultando na intensidade máxima de 111,9 mm/h, conforme a equação IDF da localidade (Porto Alegre). Os autores utilizaram um concreto poroso com o traço 1:6 na relação cimento/agregado, brita 1 de granito, revestimento superficial com 15 cm de espessura e camada de brita de 150 mm. Observa-se como o concreto utilizado por eles difere daqueles de Faria et al. (2019), mencionado em parágrafos anteriores, em que foram usadas as relações 1:3, 1:4 e 1:5, consequentemente mais resistentes.

Com a realização do experimento, puderam concluir que o concreto comum gerou escoamento imediatamente após o início da chuva, praticamente não havendo infiltração, enquanto o concreto poroso apresentou comportamento contrário, praticamente não gerando escoamento. Conforme Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), o coeficiente de escoamento do concreto poroso foi inferior a 0,01, enquanto o coeficiente de escoamento do concreto comum foi de 0,95.

Batezini e Balbo (2015) analisaram a influência de diferentes combinações de agregados graúdos de diâmetros entre 9,5 mm, 6,3 mm e 4,75 mm sobre a permeabilidade do concreto permeável. Para isso, realizaram ensaios de permeabilidade com carga variável e com carga constante em corpos de prova produzidos para três diferentes misturas desses agregados.

Nos ensaios de carga constante, os valores médios da condutividade hidráulica variaram entre 0,13 e 0,14 cm/s, estando dentro da faixa obtida pela maioria dos autores (0,01 a 1,5 cm/s). Já nos ensaios de carga variável, os valores foram sempre superiores, sendo que os autores atribuem isso ao fato de não ter sido aplicada pressão externa no entorno das amostras, provavelmente permitindo uma considerável perda de carga pelas laterais dos corpos de prova. Vale ressaltar que no ensaio de carga constante os corpos foram envoltos por filme plástico.

Os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação da condutividade hidráulica para cada mistura são exibidos nas figuras 3.24 e 3.25 abaixo, para os ensaios com carga constante e variável respectivamente:

Figura 3.24 – Análise estatística dos resultados de condutividade hidráulica para carga constante

Parâmetro	Condutividade hidráulica (cm/s)		
	M1	M2	M3
μ	0,14	0,13	0,14
σ	0,008	0,009	0,002
cv (%)	5,66	6,80	1,50
μ = média; σ = desvio padrão; cv = coeficiente de variação			

Fonte – Batezini e Balbo (2015)

Figura 3.25 – Análise estatística dos resultados de condutividade hidráulica para carga variável

Parâmetro	Condutividade hidráulica (cm/s)		
	M1	M2	M3
μ	0,565	0,630	0,703
σ	0,058	0,065	0,054
cv (%)	10,21	10,32	7,68
μ = média; σ = desvio padrão; cv = coeficiente de variação			

Fonte – Batezini e Balbo (2015)

A principal conclusão desse trabalho foi de que a variação do diâmetro dos agregados graúdos na composição granulométrica das misturas não teve influência significativa sobre a condutividade hidráulica do concreto permeável (BATEZINI e BALBO, 2015).

Em estudo de Costa et al. (2019), identificou-se as propriedades físicas e mecânicas também de diferentes traços de concreto permeável, objetivando-se avaliar a influência da granulometria do agregado graúdo em tais propriedades. Os autores moldaram corpos de prova com os seguintes materiais: cimento CP IV 32 RS, seixo de origem quartzosa e água. Foi utilizada granulometria fixa em 12,5 mm para os seixos e foram estudados os traços 1:3, 1:4 e 1:5 para a relação cimento/agregado graúdo em massa. Ainda, as relações água/cimento variaram para cada traço, sendo respectivamente de 0,29, 0,34 e 0,40, como indicado na tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Relações de concreto permeável estudados por Costa et al. (2019)

Traço	Nomenclatura	Relação água/cimento
1:3	M1	0,29
1:4	M2	0,34
1:5	M3	0,40

Fonte – Adaptado de Costa et al. (2019)

Então, Costa et al. (2019) realizaram ensaio de compressão axial simples, segundo a ABNT NBR 5739:2007, com quatro corpos de prova para cada traço, e ensaio de permeabilidade, segundo a ABNT NBR 16416:2015, com corpo de prova cilíndrico envolto em membrana de látex em permeâmetro de carga variável. O índice de vazios do concreto em questão foi de 47%, sendo classificado como de alta porosidade.

Dentre os resultados encontrados, os autores chegaram aos valores de coeficiente de permeabilidade de 0,0733, 0,0834 e 0,1137 para M1, M2 e M3, respectivamente. Concluíram também que todos os traços produzidos tiveram resultados para compressão axial simples dentro do exigido pela NBR 16416, de no mínimo 2 MPa para tráfego leve, sendo que M3 foi o de melhor desempenho. Costa et al. (2019) afirmaram que a granulometria uniforme leva à redução da resistência mecânica e ao aumento do coeficiente de permeabilidade do concreto e, por fim, sugeriram a incorporação de aditivos ou adições para melhorar o desempenho estrutural do dispositivo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

Divinópolis é um município do estado de Minas Gerais, localizado na macrorregião do Alto São Francisco e na microrregião do Vale do Itapecerica (NASCIMENTO, 2013). Na região centro-oeste do estado e distando 118 km da capital Belo Horizonte, esse município possui uma população estimada para o ano de 2020 de 240.408 pessoas, caracterizando-se como a 12ª maior cidade mineira em número de habitantes. Ainda, Divinópolis possui uma densidade demográfica de 300,82 hab./km², a área de sua unidade territorial é de 708,115 km² e a cidade conta com 16,4% dos domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de “bueiros”, calçada, pavimentação e meio-fio) (DIVINÓPOLIS, 2020).

Segundo Nascimento (2013), o relevo do município é caracterizado por serras e mares de morros, o índice pluviométrico varia entre 1.200 mm e 1.700 mm anuais e o território é banhado pelos rios Pará e Itapecerica, ambos afluentes do rio São Francisco. Como outras cidades da região, Divinópolis insere-se nos biomas Cerrado e Mata Atlântica e, conforme Nascimento (2013), a vegetação de Cerrado encontra-se, em grande parte, degradada pela atividade pastoril e pela ocupação urbana.

A bacia do rio Pará abrange dezesseis municípios, enquanto o rio Itapecerica, afluente do primeiro, banha três municípios, cortando Divinópolis em uma extensão de 29 km. O rio Itapecerica sofre diversos impactos negativos ao cortar a zona urbana do município, fazendo com que o mesmo, tido como de classe 2 a montante da cidade, se torne classe 3 ou 4 a jusante, dependendo da época do ano. Dentre os principais impactos destaca-se a ocupação das margens pela urbanização, a degradação da mata ciliar, a exploração de areia e o assoreamento, o entulho gerado pela construção civil e a poluição de maneira geral (FUNEDI, 2013).

Sabe-se que a cidade possui um histórico de ocorrência de inundações, podendo destacar como exemplos os casos ocorridos nos bairros Maria Helena e Candelária (G1, 2012, 2019; PORTAL GERAIS, 2020), esse último com uma localização próxima à área de estudo do presente trabalho. Ainda, a margem urbana do já citado rio Itapecerica é outro importante local de risco de inundações em Divinópolis (PORTAL GERAIS, 2020). A fim de ilustrar essa condição, a figura 4.1 exibe uma situação de inundação do Itapecerica no ano de 2008, que chegou a atingir a estação de tratamento de água (ETA) da cidade:

Figura 4.1 – Inundação da ETA do Itapecerica



Fonte – FUNEDI (2013)

No caso referente à figura acima, o nível do rio subiu mais de sete metros e foi decretado estado de emergência na cidade, ficando 6.000 pessoas desalojadas, 20 casas destruídas e outras 2.000 danificadas, além de 200 lojas prejudicadas (ESTADO DE MINAS, 2008). Esses números revelam a magnitude dos prejuízos causados pelas inundações urbanas, na escala da macrodrenagem, e confirmam a afirmação feita no início dessa monografia de que esse fenômeno não mais se limita às grandes metrópoles, sendo um problema intrínseco ao modelo de desenvolvimento urbano até então vigente.

Esse estudo de caso foi realizado para o empreendimento denominado “Bairro Residencial Boa Vista”, um loteamento com área total de lotes de 100.780,54 m², área total das ruas de 60.702,76 m² e área institucional de 3.551,75 m², localizado próximo ao bairro Candelária, à rodovia MG 050 e à avenida JK, uma importante via de Divinópolis, segundo as informações disponibilizadas no site da empresa responsável. Sendo um bairro residencial, suas vias são de função local e tráfego leve, características favoráveis ao emprego de pavimentação permeável.

A figura 4.2 a seguir permite a visualização da área de estudo por meio de imagem de satélite:

Figura 4.2 - Vista área do Bairro Residencial Boa Vista, em Divinópolis – MG



Fonte – Google Earth Pro (2020)

O tipo de solo é um parâmetro de extrema importância para se verificar a viabilidade de implantação de técnicas de infiltração, como os pavimentos permeáveis. No Brasil, a classificação de um solo é feita de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, o qual baseia-se em características morfológicas e genéticas descritas nos horizontes do solo, contemporizadas em sistema de chave taxonômica. Esse sistema distingue treze grandes classes de solos representativas das paisagens brasileiras, são eles: Argissolos; Cambissolos; Chernossolos; Espodossolos; Gleissolos; Latossolos; Luvisolos; Neossolos; Nitossolos; Organossolos; Planossolos; Plintossolos; e Vertissolos (PRONASOLOS, 2020).

O Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos (PronaSolos) reúne em um sistema de informações geográficas os mapas e dados de solos produzidos ao longo dos últimos sessenta anos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e por órgãos estaduais e regionais, além de universidades (EMBRAPA, 2020).

A plataforma tecnológica do PronaSolos, lançada oficialmente no dia 3 de dezembro de 2020, tem como objetivo principal a organização e a sistematização de dados de levantamento de solos brasileiros realizados por diferentes instituições em um sistema de informações de acesso público, de fácil interpretação, extração e exportação de dados para outros sistemas (EMBRAPA, 2020).

Assim, essa plataforma foi utilizada para a extração de informações a respeito do tipo de solo em que a área de estudo está inserida. Segundo o PronaSolos (2021), Divinópolis insere-se em uma área com três tipos de solo distintos, quais sejam: Cambissolo Háptico Tb Distrófico; Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico; e Argissolo Vermelho Distrófico. Em acordo com a informação anterior, o Mapa de Solos do Brasil, disponibilizado pela Embrapa Solos, classificou a área do Bairro Boa Vista como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, a partir do cruzamento dos dados com a localização exata do empreendimento no Google Earth Pro.

De maneira geral, os latossolos são solos lixiviados e altamente desenvolvidos. Altamente intemperizados e sem incremento de argila em profundidade, esses solos possuem cores que variam de brunadas, avermelhadas ou amareladas, sendo as últimas as mais comuns. A caulinita e os óxidos de ferro são os minerais predominantes na fração argila. Latossolos ocorrem em antigas superfícies de erosão, sedimentos e terraços fluviais antigos, em relevo suavemente ondulado e plano. Ainda, são os solos mais representativos do Brasil, bem distribuídos e ocupando cerca de 39% do território nacional (PRONASOLOS, 2021).

Segundo Santos et al. (2018), latossolos variam de fortemente a bem drenados, ainda que possam ocorrer solos de cores pálidas, que são de drenagem moderada ou imperfeitamente drenada. Ainda, latossolos são normalmente muito profundos, tendo espessura raramente inferior a 1 m. Quanto à sequência de horizontes A, B e C, há pouca diferenciação de sub-horizontes e as transições são difusas ou graduais. Também, há pouco ou nenhum incremento de argila do horizonte A para o B (SANTOS et al., 2018).

Ainda conforme os autores, esses solos são típicos de regiões equatoriais e tropicais, podendo ocorrer também em zonas subtropicais, e se originam das mais diversas espécies de rochas e sedimentos sob condições de clima e tipos de vegetação bem diversos, o que justifica sua ampla distribuição no território brasileiro. A figura 4.3 é uma representação do perfil típico de um Latossolo Vermelho-Amarelo.

Figura 4.3 – Perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo



Fonte – Santos et al. (2018)

Em documento elaborado pela Fundação Educacional de Divinópolis (FUNEDI), foi feita uma síntese do diagnóstico participativo da cidade, o qual auxiliou a elaboração do Plano Diretor de Divinópolis, legislação orientadora do desenvolvimento e ordenamento da expansão urbana do município (FUNEDI, 2013). Com isso, observa-se a existência de um diálogo entre instituições, técnicos e o cidadão comum, condição essencial para a proposição de políticas públicas que levem em conta os anseios de diferentes grupos da sociedade, contribuindo para a democratização do espaço público.

O Plano Diretor de Divinópolis é estabelecido pela Lei complementar nº 169/2014. Dentre as várias diretrizes que o documento traz, destacam-se aqui alguns pontos relacionados à política ambiental do município: revitalização do rio Itapecerica e seus afluentes; elaboração de carta geotécnica delimitando as áreas inundáveis do rio Itapecerica; revisão do Plano Municipal de Saneamento; estímulo ao desenvolvimento de novas tecnologias e inovações ambientais na área de saneamento em parceria com entidades de pesquisa; estabelecimento de índices mínimos de permeabilização do solo; elaboração do Plano Municipal de Drenagem Urbana; e adoção de percentuais mínimos de permeabilidade do solo em novas edificações a serem aprovadas.

Pelas ações apontadas acima, fica evidente a preocupação do governo municipal com a questão das inundações, bem como a busca pela expansão urbana mais sustentável e compatível com as condições naturais do território. Portanto, pode-se dizer que tal lei vai ao encontro daquilo que é desejado para o desenvolvimento urbano no século XXI, como a contemplação dos princípios básicos da drenagem sustentável e, mais importante, a efetivação e implantação de tais práticas.

Porém, não há nenhuma diretriz no plano diretor que aborde especificamente a utilização de pavimentos permeáveis ou outras técnicas compensatórias, o que poderia complementar e agregar valor às diretrizes e ações mencionadas no parágrafo anterior. Portanto, ainda que trate beneficentemente de temas relacionados à sustentabilidade na drenagem pluvial, o plano diretor de Divinópolis é ainda limitado e espera-se que maiores detalhes sejam gradativamente incorporados em legislações futuras.

4.2 Procedimentos

O primeiro passo para a execução deste trabalho foi a realização de uma revisão bibliográfica, onde foram estudados diversos documentos relacionados aos conteúdos apresentados em tópicos anteriores, como livros, artigos, teses, dissertações, monografias, legislações, normas, notícias de revistas e jornais e vídeos de palestras disponibilizados na internet.

Com isso, foi possível aprofundar no tema, conhecendo e entendendo os mecanismos de funcionamento dos pavimentos permeáveis, os tipos existentes, suas vantagens e desvantagens, suas possibilidades de uso e limitações, alguns casos de sucesso no Brasil e no mundo, o estado da arte de forma geral e, por fim, os critérios e métodos de dimensionamento, além, é claro, de aprimorar os conhecimentos acerca da drenagem urbana e da problemática das inundações.

Em seguida, foi necessário contatar a empresa construtora responsável pelo empreendimento “Bairro Residencial Boa Vista”, localizado no município de Divinópolis, Minas Gerais, para a solicitação de acesso aos documentos necessários para a realização do estudo de caso proposto. Assim, a empresa forneceu os memoriais descritivo e quantitativo (em formato PDF), a planilha de cálculo das contribuições e cálculo hidráulico das galerias (em formato XLS) e a planta do empreendimento (em formato DWG), todos relacionados à rede de drenagem do loteamento. Vale ressaltar que, para a realização deste trabalho, foi necessário um computador com acesso à internet e os softwares AutoCAD e Excel.

Foi realizado um diagnóstico da área de estudo com base nos documentos citados no parágrafo anterior, bem como em trabalhos de outros autores e informações disponíveis em mapas de fácil acesso, como de tipo de solo, e imagens de satélite. Uma visita técnica à área de estudo seria interessante para agregar informações, mas em função das dificuldades impostas pela pandemia de coronavírus vivenciada na época de realização deste trabalho, optou-se por sua execução totalmente a distância.

Com os conhecimentos proporcionados pela revisão da literatura e com as informações acerca do loteamento em estudo fornecidas pela construtora responsável, foi possível propor e realizar o dimensionamento de pavimentos permeáveis de concreto para diferentes trechos das vias públicas. Ainda, foi possível verificar a influência da utilização desses dispositivos sobre o escoamento superficial e os elementos da rede de drenagem urbana da área, o que permitiu estender a discussão para a importância da utilização dessa e de outras técnicas compensatórias em novos loteamentos.

4.2.1 Diagnóstico do Sistema de Drenagem da Área

A rede de drenagem do Bairro Boa Vista é constituída de seis lançamentos distintos, independentes, cada qual composto pelos elementos manilha de concreto, boca de lobo, poço de visita, ala e dissipador de energia, os quais variam em quantidade e tipo. Esses lançamentos direcionam as vazões para uma área de preservação permanente de curso d'água adjacente ao bairro. Abaixo, na tabela 4.1, um resumo do quantitativo de materiais referentes às galerias de cada um desses sistemas de lançamento:

Tabela 4.1 – Quantitativo de materiais das galerias por lançamento

Lançamento	Comprimento (m)			Total
	Manilha concreto 400 mm	Manilha concreto 600 mm	Manilha concreto 800 mm	
1	93,00	387,00	153,00	633,00
2	34,00	37,00	0,00	71,00
3	36,00	9,00	0,00	45,00
4	330,00	676,00	12,00	1.018,00
5	173,00	219,00	76,00	468,00
6	100,00	333,00	0,00	433,00
Total	766,00	1.661,00	241,00	2.668,00

Fonte – Aatoria própria (2021)

Percebe-se que as manilhas de concreto projetadas possuem diâmetros que variam entre 400, 600 e 800 mm, em que a maioria (62%) possui diâmetro igual a 600 mm. Percebe-se também que o comprimento total apresenta bastante variação entre os lançamentos, sendo o menor deles (lançamento 3) igual a 45,00 m e o maior (lançamento 4) igual a 1.018,00 m.

Um importante critério para a seleção da técnica compensatória é a condição de localização relacionada à declividade do terreno, sendo que as vias com declividades superiores a 5% são menos adequadas para a utilização de pavimentos porosos (SCHUELER, 1987 apud SUDERHSA, 2002). Assim, para as áreas referentes a cada um dos lançamentos citados anteriormente, foram analisadas as declividades das ruas, para a escolha do local mais adequado à implantação de pavimentos permeáveis. A tabela 4.2 indica a quantidade de trechos de ruas com declividade longitudinal menor ou igual a 5%, por área de contribuição do lançamento, com as respectivas extensões totais, em metros:

Tabela 4.2 – Quantitativo de trechos das vias compatíveis com a técnica

Lançamento	Quantidade de trechos com declividade longitudinal \leq 5%	Extensão total dos trechos (m)
1	7	422,18
2	1	52,04
3	0	0,00
4	7	417,16
5	4	183,54
6	2	121,48

Fonte – Aatoria Própria (2021)

Observa-se que as áreas dos lançamentos 1 e 4 foram as que apresentaram a maior quantidade de trechos de ruas adequados à pavimentação permeável, sendo sete trechos em cada uma. Dentre as duas áreas, o lançamento 1 apresenta uma extensão total de vias compatíveis maior, de 422,18 m, em comparação aos 417,60 m do lançamento 2. Logo, a área de contribuição do lançamento 1, ou simplesmente área 1, foi selecionada para a realização deste projeto.

As figuras 4.4 e 4.5 que se seguem são imagens aéreas dessa área 1, sem e com aproximação, com as áreas de contribuição destacadas em azul e as ruas destacadas em cinza, para uma melhor visualização de sua localização dentro do loteamento e de seu aspecto geral:

Figura 4.4 – Imagem aérea da área 1



Fonte – Google Earth Pro (2021)

Figura 4.5 – Imagem aérea da área 1, aproximada



Fonte – Google Earth Pro (2021)

A área 1 possui em torno de 57.000 m² (ou 5,7 ha). Ela compreende sete ruas, denominadas Cinco, Açucena, Oito, Sete, Seis, Vila Romana e Quinze, como percebido nas imagens acima. Na tabela 4.3, expõe-se algumas medidas importantes dessas ruas:

Tabela 4.3 – Quadro de medidas das ruas da área 1

Rua	Comprimento (m)	Largura (m)	Área (m²)
Cinco	79,71	8,00	637,68
Açucena	103,99	11,00	1.143,89
Oito	238,50	8,00	1.908,00
Sete	295,35	8,00	2.362,80
Seis	115,00	8,00	920,00
Vila Romana	313,74	11,00	3.451,14
Quinze	265,85	8,00	2.126,80

Fonte – Aatoria Própria (2021)

Como pode-se perceber, as ruas Açucena e Vila Romana têm largura diferenciada das demais, de 11 m, em razão de serem consideradas vias principais do bairro, enquanto as outras são secundárias. Ainda, de acordo com a planta do empreendimento, todas as ruas têm inclinação transversal de 3%, para ambos os lados, além de 2,00 m de passeio em cada lado da pista. As ruas Açucena e Vila Romana (vias principais) possuem 2,25 m de largura de estacionamento em ambos os lados, enquanto as demais têm 2,00 m em apenas um lado, fator que mais interfere na diferença significativa entre suas larguras.

Considerando as informações exibidas nas tabelas 4.2 e 4.3, os trechos compatíveis, ou seja, aqueles com declividade inferior a 5%, foram detalhados com as seguintes informações: Rua em que estão inseridos, nomenclatura do trecho, extensão, declividade, área de contribuição (referente aos lotes) e área do pavimento, a tabela 4.4 abaixo expõe esses valores. Vale ressaltar que as ruas da área 1 dividem-se em vinte trechos e, como visto, sete tem declividade favorável.

Tabela 4.4 – Detalhamento dos trechos compatíveis com a técnica

Rua	Trecho	Extensão (m)	Declividade (m/m)	Área de contribuição (m ²)	Área do pavimento (m ²)
Cinco	-	-	-	-	-
Açucena	Y-Z	52,00	0,0164	676,00	572,00
Oito	-	-	-	-	-
Sete	V-Y	57,51	0,0152	2.021,20	460,08
Seis	-	-	-	-	-
Vila	P-Q	52,00	0,0050	1.371,75	572,00
Romana	II-U	100,54	0,0214	2.201,51	1.105,94
	UU-U	56,11	0,0322	1.298,88	448,88
Quinze	F-G	52,01	0,0059	1.547,96	416,08
	G-H	52,01	0,0073	723,09	416,08

Fonte – Autoria Própria (2021)

A figura 4.6 permite a visualização espacial dos trechos detalhados acima na área de estudo, destacados na cor verde:

Figura 4.6 – Imagem aérea dos trechos selecionados para a pavimentação permeável

Fonte – Google Earth Pro (2021)

Portanto, a partir desse julgamento prévio, esses foram os trechos para os quais a pavimentação permeável foi dimensionada, como será detalhado na sequência. Importante ressaltar que a declividade é apenas um dos vários fatores limitantes à instalação do dispositivo, sendo que os demais critérios serão exibidos na etapa de análise da viabilidade, em resultados, e servirão de base para a conclusão da viabilidade ou não da implantação dessa técnica na área proposta.

4.2.2 Projeto do Pavimento Permeável de Concreto

Como citado na revisão bibliográfica, atualmente o Brasil conta com a norma ABNT NBR 16416:2015 para o projeto de pavimentos permeáveis de concreto, a qual não poderia ser desprezada no presente trabalho. Porém, devido à impossibilidade de acessá-la de forma gratuita e pelo fato de diversos parâmetros presentes nela já terem sido beneficentemente exibidos em trabalhos como os de Nigri (2017) e Motta (2019), o dimensionamento que se segue utilizará tal norma de forma indireta, sempre conforme o que fora apresentado por esses e outros autores.

Motta (2019) descreve as seguintes etapas para a elaboração de projetos de pavimentos permeáveis: concepção funcional do empreendimento; estudo de viabilidade; estudos complementares (características gerais do local, do subleito, estudos hidrológicos, topográficos e de tráfego); e projetos (geométricos, terraplenagem, drenagem, pavimentação e urbanização).

Ainda conforme Motta (2019), a etapa de concepção funcional do empreendimento refere-se à definição do tipo de uso do pavimento, por exemplo para áreas de estacionamento, calçadas, parques, vias urbanas de baixo tráfego, etc. No presente trabalho, propôs-se o uso de pavimentação permeável em vias urbanas de baixo tráfego de um bairro residencial. A análise da viabilidade técnica trata da verificação se o pavimento permeável é a alternativa de controle na fonte mais adequada para as condições do local de implantação, o que dependerá de fatores como as condições do solo subjacente, do lençol freático e a carga difusa de finos e poluentes.

Percebe-se que um projeto de pavimentos permeáveis, como qualquer projeto de engenharia, envolve uma gama de estudos técnicos, que integram hidrologia, topografia, geotecnia, entre outras áreas de conhecimento, exigindo a presença de uma equipe técnica para a realização de análises em campo e retirada de amostras para análises em laboratório. Não é a intenção deste trabalho realizar todos esses estudos à risca, limitando-se apenas àqueles que aqui caibam, dadas as limitações de tempo e ausência de equipe técnica. Portanto, focou-se principalmente

no estudo de viabilidade e no dimensionamento dos dispositivos, tendo em vista que os projetos geométricos, de drenagem, de urbanização, etc. já foram executados pela empresa responsável.

O dimensionamento de pavimentos permeáveis refere-se à definição dos materiais e espessuras das camadas que os compõe, sendo que o mesmo deve ser elaborado a partir dos enfoques mecânico e hidráulico. O enfoque mecânico diz respeito à espessura necessária para suporte do tráfego de projeto, enquanto o enfoque hidráulico aborda a espessura necessária para armazenamento e amortecimento da vazão afluyente (NIGRI, 2017; MOTTA, 2019). É fácil concluir que a espessura a ser utilizada deverá ser a maior entre os dois resultados obtidos.

A ABNT NBR 16416:2015 oferece um quadro relacionando o tipo de revestimento, o tipo de solicitação, a espessura mínima, a resistência mecânica característica e o método de ensaio para o projetista avaliar a viabilidade do pavimento. O mesmo é reproduzido parcialmente na tabela 4.5 abaixo:

Tabela 4.5 – Valores mínimos para o dimensionamento mecânico do pavimento

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 2,0^b$	ABNT
	Tráfego leve	80		NBR 15805
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60	$\geq 1,0^c$	ABNT
	Tráfego leve	100		NBR 12142

b: determinação da resistência à flexão, conforme a ABNT NBR 15805

c: determinação da resistência à tração na flexão, conforme a ABNT NBR 12142

Fonte – Adaptado de ABNT (2015 apud NIGRI, 2017)

Para esse estudo, optou-se pela utilização de concreto permeável moldado no local e, considerando sua aplicação em vias de tráfego leve, nota-se que a camada de revestimento deverá ter uma espessura mínima de 100 mm, ou 10 cm, e contar com resistência à tração na flexão mínima de 2 MPa. O ensaio de resistência à tração na flexão deve ser executado conforme a norma ANBT NBR 12142:2010, porém, para o prosseguimento deste trabalho, de cunho teórico, assumiu-se a utilização de materiais e traços que resultem em uma resistência satisfatória, tendo como base experimentos de outros autores descritos na revisão bibliográfica.

Já o dimensionamento hidráulico é realizado com base em método proposto pela NBR 16416 ou por outro método de dimensionamento compatível (NIGRI, 2017). Aqui, foram selecionados dois métodos encontrados na literatura, o primeiro é a metodologia elaborada por Silveira e Goldenfum (2007) para o pré-dimensionamento de pavimentos permeáveis, enquanto o segundo é indicado no Manual de Drenagem Urbana de Curitiba (SUDERHSA, 2002). Cabe justificar que foram estudadas duas metodologias de dimensionamento distintas para que fosse possível compará-las e escolher a mais adequada. Ambas serão detalhadas a seguir.

4.2.2.1 Metodologia Elaborada por Silveira e Goldenfum

Segundo Silveira e Goldenfum (2007), projetos de obras pluviais de pequeno porte, como é o caso das medidas de controle do escoamento na fonte, exigem métodos simples e confiáveis de dimensionamento, para não tornar complexo o estudo de alternativas que, muitas vezes, pode envolver arranjos de diferentes dispositivos. Os autores desenvolveram uma metodologia generalizada para o pré-dimensionamento hidrológico de dispositivos de controle na fonte, etapa essa que associa uma chuva de projeto a um balanço hídrico simplificado, calculando os volumes de armazenamento e, conseqüentemente, as dimensões mínimas desses dispositivos.

Silveira e Goldenfum (2007) afirmam ainda que outras exigências devem superpor-se ao pré-dimensionamento hidrológico, como aquelas requeridas pelo dimensionamento estrutural, condição já citada anteriormente. Ainda, importante mencionar que essa metodologia considera somente o aspecto quantitativo da retenção e/ou redução do escoamento superficial, desprezando o controle da poluição. Para trabalhos que pretendam considerar aspectos qualitativos dessas águas, recomenda-se o uso de *softwares* de simulação computacional, como por exemplo o *Storm Water Management Model*, o que não é o foco do presente trabalho.

Admitindo-se o uso de pavimentação permeável do tipo infiltração total, calcula-se inicialmente o volume máximo de armazenamento da camada de base, ou camada reservatório, conforme a equação 4.1 abaixo:

$$V_{m\acute{a}x} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} T^{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{q_s} \right)^2 \quad (4.1)$$

Onde:

$V_{m\acute{a}x}$: volume de dimensionamento, ou volume máximo, em mm;

a , b e c : parâmetros da equação IDF de Talbot;

β : produto do coeficiente de escoamento pela razão entre área contribuinte e área do dispositivo;
 T: tempo de retorno, em anos;
 q_s : vazão de saída constante do dispositivo, em mm.h^{-1} .

Com o volume máximo, calcula-se a espessura da camada reservatório através da equação 4.2:

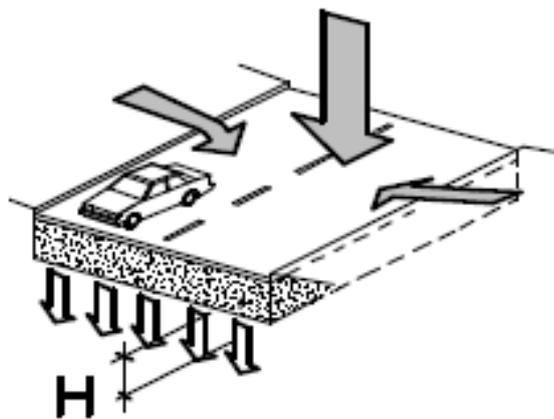
$$H = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\eta} \quad (4.2)$$

Onde:

H : espessura da camada reservatório, em mm;
 η : porosidade do material de preenchimento da camada.

Abaixo, na figura 4.7, uma representação esquemática da espessura da camada reservatório do pavimento permeável:

Figura 4.7 – Representação esquemática da altura da camada reservatório



Fonte - Silveira e Goldenfum (2007)

Conforme os autores, é possível utilizar as equações 4.1 e 4.2 para qualquer localidade, desde que se disponha dos parâmetros locais de chuvas intensas (efetuando a conversão da equação IDF para o formato da IDF de Talbot), da condutividade hidráulica saturada do solo e das condições limitantes de vazão, como vazão de pré-ocupação ou de restrição.

A expressão de Talbot é apresentada na equação 4.3:

$$i = \frac{aT^b}{t + c} \quad (4.3)$$

Onde:

i : intensidade da chuva, em mm.h^{-1} ;

T : tempo de retorno, em anos;

t : duração da chuva, em min;

a , b e c : parâmetros da equação;

No Brasil, a expressão acima não é muito utilizada, predominando-se o seguinte formato para a equação IDF, indicado aqui por equação 4.4:

$$i = \frac{kT^m}{(t + d)^n} \quad (4.4)$$

Para utilizar a IDF de Talbot, de acordo com Silveira e Goldenfum (2007), basta realizar a conversão dos parâmetros k , m , n e d da equação 4.4 para a , b e c da equação 4.3 por meio das seguintes expressões de conversão:

$$a = 0,68k \exp(0,06n^{-0,26}d^{1,13}) \quad (4.5)$$

$$b = m \quad (4.6)$$

$$c = 1,32n^{-2,28}d^{0,89} \quad (4.7)$$

Por fim, é geralmente necessário acrescentar um coeficiente de ajuste adicional ao coeficiente a , sendo o mesmo definido pelo projetista através da comparação das intensidades resultantes de ambas as IDF.

4.2.2.2 Método do Manual de Drenagem Urbana de Curitiba

Nesse método, diferentemente do anterior, não é necessário converter os parâmetros da equação IDF para a IDF de Talbot, e por isso a equação do volume é diferente. Conforme SUDERHSA (2002), a expressão aproximada do volume de acumulação na camada porosa é dada pela equação 4.8 abaixo:

$$V = (7,11\sqrt{\beta}T^{0,129} - 0,64\sqrt{q_s})^2 \quad (4.8)$$

Onde:

V : Volume de acumulação, em mm;

β : Coeficiente adimensional dado pela multiplicação do coeficiente de escoamento pela razão entre área contribuinte e área do dispositivo;

T : Tempo de retorno, em anos;

q_s : Vazão de saída do dispositivo, em mm.h⁻¹.

A equação 4.9 indica como o coeficiente β anterior é obtido:

$$\beta = \frac{A_{pav} + CA}{A_{pav}} \quad (4.9)$$

Onde:

A_{pav} : Área do pavimento permeável, em m²;

A : Área de contribuição do pavimento, em m²;

C : Coeficiente de escoamento da área de contribuição.

A vazão de saída q_s corresponde à condutividade hidráulica saturada do solo, que é dada em mm.h⁻¹, afetada por um coeficiente redutor relacionado à colmatção, geralmente compreendido entre 0,1 e 0,5 (SUDERHSA, 2002).

Então, a espessura da camada reservatório é calculada conforme a equação 4.2, já exibida anteriormente.

Assim, efetuando-se o dimensionamento de acordo com as duas metodologias apresentadas, como será visto em tópicos seguintes, foi possível analisar a principal diferença entre elas para, enfim, decidir definitivamente por uma, julgada mais apropriada pelo autor.

Após a análise da viabilidade técnica e o dimensionamento dos pavimentos permeáveis para cada trecho, foi realizada a comparação das vazões escoadas antes, no cenário do projeto original do loteamento, e depois, no cenário com a inclusão da técnica compensatória proposta, bem como a verificação da interferência da diminuição das vazões sobre os diâmetros calculados das galerias subterrâneas, analisando a possibilidade ou não de redução dos diâmetros comerciais adotados como um benefício econômico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise da Viabilidade Técnica

Para o estudo de viabilidade, foram analisados os principais critérios limitantes à implantação de pavimentos permeáveis, com base nas informações disponíveis no Manual de Drenagem Urbana de Curitiba (SUDERHSA, 2002). Tais critérios foram divididos em três categorias, que são: condições de solo e aquífero; condições superficiais do terreno; e condições ligadas à dinâmica de urbanização. Para melhor visualização, foram feitos três quadros que resumem as principais informações, seguidos das análises detalhadas e da justificativa para cada parâmetro.

O primeiro quadro, exibido na figura 5.1, indica os fatores relacionados às condições de solo e aquífero, sendo todos dependentes do tipo de solo da região, já descrito na caracterização da área de estudo, que, como afirmado, é um parâmetro fundamental na verificação da viabilidade de implantação de técnicas de infiltração de modo geral.

Figura 5.1 – Viabilidade da técnica segundo critérios de solo e aquífero

Critério	Restrição	Condição da área de estudo	Observações
Capacidade de infiltração no solo	Deve ser superior a 7 mm/h	Favorável	Solo varia de fortemente a bem drenado
Permeabilidade do subsolo	Deve manter a permeabilidade em profundidades maiores	Favorável	Solo não possui incremento de argila em profundidade
Fragilidade do subsolo (capacidade suporte e características hidráulicas)	Solo não deve ser argiloso ou ter muitos finos	Favorável	Solo com textura granular e em torno de 20% de argila
Nível do lençol freático	Deve estar a no mínimo 1 metro abaixo do fundo do dispositivo	Favorável	Latosolos são geralmente muito profundos

Fonte: Adaptado de SUDERHSA (2002)

O Latossolo Vermelho-Amarelo possui uma textura granular, com teor de argila em torno de 20% e é considerado bem drenado. Por apresentar pouca diferenciação de textura entre os horizontes A e B, sem incremento de argila em profundidade, assume-se que a permeabilidade do solo se mantenha mesmo em profundidades maiores. Como afirmado, devido à textura granular e ao reduzido teor de argila, é também adequado quanto à capacidade suporte e características hidráulicas.

Latossolos são muito profundos, portanto admite-se que atendam às exigências de afastamento do lençol freático. Outro critério importante, não contemplado acima, é a identificação se a área é uma zona de recarga de aquífero. Por fim, é importante deixar claro que todos esses critérios foram analisados apenas com as informações do tipo de solo da região e, para uma possível implantação do que é aqui proposto, estudos geotécnicos são indispensáveis para a confirmação das hipóteses iniciais.

O segundo quadro, exibido na figura 5.2, determina os fatores relacionados às condições superficiais do terreno:

Figura 5.2 – Viabilidade da técnica segundo condições superficiais do terreno

Critério	Restrição	Condição da área de estudo	Observações
Área de contribuição	Ideal que esteja entre 0 e 6 hectares	Favorável	A área de estudo possui 5,7 hectares
Declividade	Ideal que seja inferior ou igual a 5%	Favorável	Foram filtrados os trechos com declividades compatíveis
Disponibilidade de área	Devem haver áreas livres disponíveis para a implantação da técnica	Favorável	Sendo um loteamento novo, as vias poderão ser projetadas já considerando a técnica
Exutório para quando o dispositivo saturar	Deve contar com exutório	Favorável	Rede de drenagem do bairro

Fonte – Adaptado de SUDERHSA (2002)

Como pode ser visto na caracterização da área, bem como nos procedimentos descritos na metodologia desse trabalho, a área 1 possui 5,7 hectares, já se encaixando na faixa adequada, mas as áreas de contribuição de cada pavimento permeável são ainda menores, de 676,00 a 2.298,88 m², totalmente compatíveis com a implantação deles. Como os trechos passíveis de pavimentação permeável já foram selecionados levando em consideração a declividade, todos são igualmente adequados.

Já com relação a disponibilidade de áreas livres para a implantação dos dispositivos, ressalta-se que esse estudo contempla um bairro em fase de execução, portanto a ideia é pavimentar os trechos destacados como permeáveis desde o início, sem a necessidade de reformar vias já consolidadas, o que gera uma economia com maquinário e mão de obra. Ainda, o sistema de drenagem permanece presente na área, sendo o exutório para quando o volume máximo da camada reservatório de cada pavimento permeável for atingido.

O terceiro quadro, figura 5.3, indica os fatores relacionados à dinâmica de urbanização, tomando como base a possibilidade de presença de outros elementos da infraestrutura urbana, como redes de água e esgoto, e de como o desenvolvimento da área pode afetar a pavimentação permeável.

Figura 5.3 – Viabilidade da técnica segundo a dinâmica de urbanização

Critério	Restrição	Condição da área de estudo	Observações
Instalações subterrâneas	Ausência de instalações subterrâneas na área de percolação da água no solo	Favorável	Sendo um loteamento novo, o projeto poderá alocar tais instalações adequadamente
Restrição de urbanização	Área deve contar apenas com tráfego leve	Atenção	Acompanhar a expansão da região e os aumentos no tráfego. Sinalizações poderão auxiliar
Afluência poluída (sedimentos, lixo, esgoto e lavagem das ruas)	Ausência de tais poluentes	Atenção	Prevê-se grande quantidade de resíduo da construção civil até a consolidação do bairro

Fonte – Adaptado de SUDERHSA (2002)

Certamente, o cruzamento de redes, como de água e esgoto, com a camada reservatório dos pavimentos permeáveis geraria certos prejuízos, como a diminuição do volume de armazenamento ou a contaminação com possíveis vazamentos. Para exemplificar, pode-se imaginar duas situações: o esgoto contaminando o lençol freático ou a água da chuva contaminando o abastecimento público. Outras instalações subterrâneas podem interferir também, como a telefonia. Mas, sendo um loteamento novo, essas questões podem ser facilmente contornadas na etapa de projeto, realizando as adequações necessárias para compatibilizar a pavimentação permeável com as instalações subterrâneas do bairro.

Uma das restrições mais importantes refere-se à intensidade do tráfego nas vias com pavimentação permeável. Sendo um bairro residencial, acredita-se que predominará o tráfego leve, relacionado à movimentação dos próprios moradores. Porém, é necessário acompanhar a expansão da região, por exemplo pelo surgimento de outros bairros no entorno do Boa Vista, onde a dinâmica do trânsito pode se modificar significativamente ao longo dos anos.

Como os pavimentos permeáveis foram projetados para trechos de algumas ruas, representando uma proporção muito pequena das vias totais, sugere-se um planejamento especial do trânsito para esses trechos. Ações como a conscientização dos moradores, restrições de velocidade, sinalização indicativa dos dispositivos e até placas proibindo estacionar nesses trechos (para evitar as tensões de cisalhamento geradas no contato do pneu com o pavimento em manobras) poderiam contribuir para a minimização dos danos e aumento da vida útil desses pavimentos.

Quanto à afluência poluída, destaca-se o fato de que são esperadas muitas obras ao longo dos próximos anos, relacionadas principalmente à construção de casas, o que gera uma grande quantidade de resíduos da construção civil. Assim, especialmente naqueles lotes situados nas bacias de contribuição dos pavimentos permeáveis, será necessário um monitoramento maior dos resíduos, bem como dos materiais de construção, para evitar que os mesmos sejam carreados em grande quantidade para as vias, por exemplo em situações de chuva. Sugere-se a disposição adequada dos materiais em baias, a retirada rápida dos resíduos e o acompanhamento de profissionais capacitados para a realização desse controle nas obras. Após o final delas, sugere-se a realização de ensaio de permeabilidade no pavimento, conforme ABNT NBR 16416:2015, para verificar possível colmatação.

Já a poluição oriunda do lixo, esgoto e lavagem das ruas, não deverá ser tão significativa, desde que haja uma gestão adequada dos demais serviços de saneamento básico, como as coletas de

lixo e esgoto. Sendo o tráfego leve, os principais poluentes que atingirão a superfície dos pavimentos serão partículas liberadas do atrito dos pneus com o chão e produtos da combustão. De forma geral, é aconselhado o monitoramento da colmatção dos pavimentos, a partir do ensaio citado anteriormente, anualmente antes do início do período chuvoso, para que seja possível realizar as manutenções necessárias (limpeza), otimizando sua eficiência.

5.2 Dimensionamento dos Pavimentos Permeáveis

Tendo definido que os pavimentos seriam de infiltração total, em função das características favoráveis do tipo de solo da região, foi possível efetuar o dimensionamento da espessura da camada reservatório pelos métodos descritos nos procedimentos. Para isso, foram consideradas as informações sobre os trechos indicadas na tabela 4.4 e adotada uma vazão de saída constante de 1,5 mm/h, referente à uma condutividade hidráulica do solo de 15 mm/h e um coeficiente redutor de 0,1, pelo fato de tais valores terem sido indicados tanto por Silveira e Goldenfum (2007) quanto por SUDERHSA (2002) como representativos de um solo bem drenado.

Ainda, os pavimentos permeáveis foram inicialmente dimensionados para atenderem a chuvas com período de retorno de 2 anos, novamente por ser um valor recomendado por Silveira e Goldenfum (2007) e SUDERHSA (2002). Cabe mencionar que, ainda que a rede de microdrenagem seja dimensionada para chuvas com tempo de retorno maiores, os pavimentos permeáveis são dispositivos usualmente projetados para atuarem no interior dos lotes, o que justifica o menor valor do período de retorno recomendado na literatura. Ambos os resultados foram organizados nas tabelas 5.1 e 5.2 e discutidos na sequência delas.

Tabela 5.1 – Resultados do dimensionamento conforme Silveira e Goldenfum

Rua	Trecho	Área de	Área do	Coeficiente	Volume	Espessura
		contribuição	pavimento			
		(m ²)	(m ²)	β	(mm)	(cm)
Açucena	Y-Z	676,00	572,00	1,47	109,0	31,1
Sete	V-Y	2.021,20	460,08	2,76	213,0	60,9
Vila	P-Q	1.371,75	572,00	1,96	148,1	42,3
Romana	II-U	2.201,51	1.105,94	1,80	135,0	38,6
	UU-U	1.298,88	448,88	2,16	164,2	46,9
Quinze	F-G	1.547,96	416,08	2,49	191,1	54,6
	G-H	723,09	416,08	1,70	126,8	36,2

Fonte – Aatoria Própria (2021)

Como pode-se perceber, a espessura da camada de base dos pavimentos variou de 31,1 cm a 60,9 cm, valores considerados razoáveis e passíveis de implementação. Conforme SUDERHSA (2002), tal espessura apresenta variação usual entre 50 e 80 cm, com base na experiência internacional. Como cinco dos sete pavimentos aqui dimensionados tiveram medidas abaixo desse intervalo, pode-se afirmar um caráter conservador do dimensionamento e, caso seja de interesse do projetista, é possível ampliar essa medida para abranger maiores áreas de contribuição ou chuvas com maior período de retorno.

Tabela 5.2 – Resultados do dimensionamento conforme Manual de Drenagem Urbana de Curitiba

Rua	Trecho	Área de	Área do	Coeficiente	Volume	Espessura
		contribuição	pavimento			
		(m ²)	(m ²)	β	(mm)	(cm)
Açucena	Y-Z	676,00	572,00	1,47	74,9	21,4
Sete	V-Y	2.021,20	460,08	2,76	147,1	42,0
Vila	P-Q	1.371,75	572,00	1,96	102,0	29,1
Romana	II-U	2.201,51	1.105,94	1,80	92,9	26,5
	UU-U	1.298,88	448,88	2,16	113,1	32,3
Quinze	F-G	1.547,96	416,08	2,49	131,8	37,7
	G-H	723,09	416,08	1,70	87,2	24,9

Fonte – Aatoria Própria (2021)

Observa-se que a segunda metodologia resultou em valores de espessura das camadas de base bem inferiores aos obtidos pela primeira. Verificou-se que o método de Silveira e Goldenfum resulta em medidas maiores que o método do Manual de Drenagem Urbana na razão de 1,45. Destaca-se também que todos os valores obtidos por esse segundo foram inferiores ao citado intervalo usual, de 50 cm a 80 cm (SUDERHSA, 2002). Assim, concluem-se dois pontos principais: Tal dimensionamento foi igualmente conservador, afinal as áreas de contribuição e de pavimento foram as mesmas, e a possibilidade do método levar a um sub dimensionamento das estruturas.

Então, por questões de segurança, optou-se definitivamente pela primeira metodologia e, levando em consideração o que foi debatido em parágrafo anterior, realizou-se novamente o dimensionamento dos dispositivos para atenderem a chuvas de maior intensidade, tendo como referência o valor máximo de 80 cm, o qual, mesmo não sendo uma limitação obrigatória, é uma recomendação válida.

A tabela 5.3 exhibe os resultados obtidos pela metodologia de Silveira e Goldenfum (2007), agora para chuvas com tempo de retorno de 5 anos, a fim de verificar a viabilidade dos dispositivos para a atenuação de maiores escoamentos superficiais, consequentes de maiores chuvas, além daquelas com tempo de retorno de 2 anos. As áreas de contribuição e do pavimento, bem como o coeficiente β são exatamente iguais aos valores das tabelas 5.1 e 5.2, portanto apenas o volume e a espessura foram indicados:

Tabela 5.3 – Resultados do dimensionamento escolhido com tempo de retorno de 5 anos

Rua	Trecho	Volume	Espessura
		(mm)	(cm)
Açucena	Y-Z	133,4	38,1
Sete	V-Y	259,7	74,2
Vila Romana	P-Q	181,0	51,7
	II-U	165,0	47,1
	UU-U	200,4	57,3
Quinze	F-G	233,1	66,6
	G-H	155,1	44,3

Fonte – Autoria Própria (2021)

Com o novo dimensionamento, três dos sete pavimentos, trechos Y-Z, II-U e G-H, ainda tiveram espessura abaixo daquele intervalo usual, enquanto o trecho V-Y, já próximo da referência de 80 cm, foi o mais profundo, o que já era esperado por ser o dispositivo com maior coeficiente β , ou seja, maior razão entre área de contribuição e área do pavimento. No geral, as medidas variaram de 38,1 cm a 74,2 cm.

Para complementar o dimensionamento dos pavimentos, selecionou-se alguns valores interessantes para a composição do concreto, relacionados aos melhores valores encontrados em estudos de outros autores e exibidos na revisão bibliográfica, para os parâmetros relação cimento / agregado, relação água / cimento e diâmetro dos agregados graúdos. A figura 5.4 aponta essas informações:

Figura 5.4 – Sugestão de composição do concreto permeável

Parâmetro	Valor	Fonte	Justificativa
Relação cimento / agregado	1:3	Faria et al. (2019) e Costa et al. (2019)	Atendem às especificações de resistência mecânica da ABNT NBR 16416
Relação água / cimento	0,34	Faria et al. (2019)	Utilizado para o traço acima
Diâmetro dos agregados graúdos	9,5 mm	Batezini e Balbo (2015)	Resultam em condutividade hidráulica de 0,14 cm/s

Fonte – Autoria Própria (2021)

Para a relação cimento / agregado foi escolhido o traço 1:3, pois o mesmo foi estudado tanto por Faria et al. (2019) quanto por Costa et al. (2019) e ambos concluíram que esse traço atende aos valores mínimos de resistência mecânica estabelecidos pela norma ANBT NBR 16416. Para a relação água / cimento, foi mantido o mesmo valor utilizado por Faria et al. (2019) para o traço 1:3 citado. Quanto ao diâmetro dos agregados graúdos, adotou-se o valor indicado por Batezini e Balbo (2015), pela boa condutividade hidráulica.

5.3 Redução do Escoamento Superficial

Concluído o dimensionamento dos pavimentos permeáveis, foi possível verificar a interferência deles sobre o escoamento superficial da área de estudo. Foram analisadas as consequências sobre diferentes escalas: a redução do escoamento superficial por cada trecho com pavimento

permeável, por cada boca de lobo coletora das vazões oriundas de áreas afetadas pelos dispositivos, pelo total da área do lançamento 1 e, finalmente, pelo total do bairro Boa Vista.

Importante mencionar que a planilha de cálculo das contribuições original do empreendimento foi elaborada para uma precipitação com intensidade de 194,48 mm/h, referente à equação IDF de Belo Horizonte (localidade mais próxima de Divinópolis a contar com dados consistentes) com tempo de retorno de 10 anos, enquanto os pavimentos permeáveis foram dimensionados para chuvas com intensidade de 161,93 mm/h, referente à equação IDF de Divinópolis (interpolação fornecida pelo *software* Plúvio, como dito em materiais e métodos) com tempo de retorno de 5 anos. Assim, a vazão restante de cada trecho foi obtida pela subtração entre a vazão anterior e a vazão abatida pelos pavimentos, cada qual calculada com a intensidade de precipitação apropriada, sempre conforme o método racional, como indicado na equação 5.1:

$$Q = 2,78 \cdot C \cdot i \cdot A \quad (5.1)$$

Onde:

Q : Vazão, em $L.s^{-1}$;

C : Coeficiente de escoamento da área de contribuição;

i : Intensidade de precipitação, em $mm.h^{-1}$;

A : Área de contribuição, em ha.

A tabela 5.4 apresenta a vazão restante em cada trecho, bem como o percentual reduzido da vazão original:

Tabela 5.4 – Redução do escoamento superficial por trecho com pavimentação permeável

Trecho	Vazão original (L/s)	Vazão abatida pelo dispositivo (L/s)	Vazão restante (L/s)	% reduzida
Y-Z	18,4	15,3	3,1	83,3
V-Y	54,9	45,7	9,2	83,3
P-Q	37,3	31,0	6,2	83,3
II-U	59,8	49,8	10,0	83,3
UU-U	35,3	29,4	5,9	83,3
F-G	42,1	35,0	7,0	83,3
G-H	19,6	16,4	3,3	83,3

Fonte – Aatoria Própria (2021)

Nota-se que, ainda que os valores brutos da vazão abatida por trecho variem de 15,3 L/s, no trecho Y-Z, até 49,8, no trecho II-U, a redução percentual é igual para todos eles, de 83,3%, como esperado, já que os trechos foram projetados justamente para infiltrar uma chuva de projeto pré-determinada. Ainda, é interessante lembrar que, mesmo que os dispositivos tenham sido projetados para infiltração total, há esse excesso (16,7%) relacionado à diferença entre as precipitações consideradas no dimensionamento da microdrenagem original, com tempo de retorno de 10 anos, e no dimensionamento dos pavimentos permeáveis, com tempo de retorno de 5 anos.

Dentre os elementos que compõe a rede de microdrenagem do bairro Boa Vista, estão as bocas de lobo, variadas entre simples ou duplas, denominadas no projeto original como BLS ou BLD, respectivamente, seguidas de uma determinada numeração. Aqui, nem todas terão a vazão contribuinte afetada pelos pavimentos permeáveis, já que eles se limitaram a sete trechos do total de ruas. Assim, nove das dezoito bocas de lobo que compõe a área 1 foram afetadas e captarão menores vazões. A tabela 5.5 indica quais são esses elementos, bem como as vazões antes e depois do dimensionamento dos pavimentos permeáveis, além da redução percentual:

Tabela 5.5 – Redução do escoamento superficial por boca de lobo afetada

Boca de lobo	Trecho com pavimento permeável na área de contribuição	Vazão antes (L/s)	Vazão depois (L/s)	% reduzida
BLS4	V-Y	91,3	63,8	30,1
BLD14	V-Y	134,1	115,9	13,6
BLS12	P-Q	57,4	41,1	28,4
BLD15	Y-Z	81,2	65,9	18,8
BLD31	II-U	265,5	233,9	11,9
	II-U			
BLS14	UU-U	105,6	58,1	45,0
	UU-U			
BLD7	P-Q	90,4	75,7	16,3
	F-G			
BLS8	G-H	39,3	6,6	83,3
	F-G			
BLS9	G-H	22,4	3,7	83,3

Fonte – Autorial Própria (2021)

A redução do escoamento variou de 11,9% a 83,3%. Destaca-se que as bocas de lobo BLS8 e BLS9, pelo fato de coletarem apenas escoamento oriundo de trechos com pavimentação permeável, apresentaram a mesma redução de 83,3% observada nos trechos analisados individualmente. Já a boca de lobo BLD31, por coletar o escoamento de um longo trecho impermeabilizado e uma pequena parcela com pavimento permeável, apresentou a menor redução de vazão entre os elementos afetados. A figura 5.5 permite verificar a localização dessas bocas de lobo na área de estudo, com a indicação das ruas e das áreas dos trechos a montante com pavimentos permeáveis:

Figura 5.5 – Imagem aérea das bocas de lobo afetadas



Fonte – Google Earth Pro (2021)

Por último, foi possível verificar a influência dos pavimentos na redução do escoamento tanto para a área 1 quanto para o bairro Boa Vista na totalidade. Seguindo a lógica das tabelas anteriores, a tabela 5.6 apresenta esses resultados:

Tabela 5.6 – Redução do escoamento superficial na área 1 e no bairro todo

Área de análise	Vazão antes (L/s)	Vazão depois (L/s)	% reduzida
Área 1	1.561,1	1.338,5	14,3
Bairro Boa Vista	5.314,9	5.092,3	4,2

Fonte – Autoria Própria (2021)

Para a área 1, verificou-se uma redução geral do escoamento superficial muito boa, levando em consideração a baixa quantidade de trechos projetados para essa função. Inclusive, como apenas as declividades abaixo de 5% foram consideradas passíveis, isso levou a exclusão de trechos com declividades de por exemplo 6,2% e 6,9%, que ainda são relativamente baixas e possivelmente caberia a instalação de mais pavimentos permeáveis, e elevaria a redução final.

Verificou-se uma redução pouco expressiva para o Bairro Residencial Boa Vista em sua totalidade, o que já era esperado, já que o mesmo é dividido pelo seu sistema de drenagem em seis regiões distintas (áreas de lançamento 1, 2, 3, 4, 5 e 6) e apenas uma delas foi contemplada aqui. Porém, é pertinente afirmar que a repetição do padrão de análise e dimensionamento proposto no presente trabalho para as demais áreas de lançamento poderia levar a valores de vazões abatidas maiores, muito provavelmente dentro do intervalo de 4,2% a 14,3%, afinal a área 1 foi anteriormente julgada como a mais propícia para a técnica.

A rede de drenagem da área 1 é composta por 10 galerias subterrâneas, além de 10 poços de visita. Levando em consideração a redução observada no escoamento superficial e, conseqüentemente, na vazão captada pelas bocas de lobo afetadas, é certo haver também uma redução na vazão conduzida pelas galerias. A fim de verificar a magnitude dessa diminuição, a nova vazão de cada galeria (compreendida entre os PV's listados abaixo) foi calculada pela subtração entre a vazão original e as vazões reduzidas em cada boca de lobo à montante das tubulações. Além disso, o diâmetro das galerias foi calculado para as novas vazões e igualmente comparado com os diâmetros originais. Todos esses valores podem ser conferidos na tabela 5.7:

Tabela 5.7 – Redução da vazão e do diâmetro calculado por galeria

Galeria	Bocas de lobo afetadas a montante	Vazão antes (L/s)	Vazão depois (L/s)	Diâmetro calculado antes (mm)	Diâmetro calculado depois (mm)	% reduzida no diâmetro
PV7 – PV8	BLS4	339,2	311,7	343	333	2,9
PV8 – PV9	BLS4, BLD14	535,6	489,9	415	401	3,4
PV9 – PV35	BLS4, BLD14, BLS12, BLD15	736,6	659,3	429	411	4,2
PV35 – PV10	BLS4, BLD14, BLS12, BLD15	736,6	659,3	435	417	4,1
PV10 – PV11	BLS4, BLD14, BLS12, BLD15	736,6	659,3	445	427	4,0
PV11- PV12	BLS4, BLD14, BLS12, BLD15, BLS14, BLD31	1.107,7	951,3	757	715	5,5
PV12 – PV14	BLS4, BLD14, BLS12, BLD15, BLS14, BLD31	1.107,7	951,3	552	522	5,4
PV14 – PV6	BLS4, BLD14, BLS12, BLD15, BLS14, BLD31	1.179,6	1.023,2	631	598	5,2
PV5 – PV6	BLD7	185,5	170,8	364	353	3,0
PV6 - Lançamento	BLS4, BLD14, BLS12, BLD15, BLS14, BLD31, BLD7, BLS8, BLS9	1.561,1	1.338,5	786	742	5,6

Fonte – Autoria Própria (2021)

As reduções nos diâmetros variaram de 2,9% a 5,6%, sendo mais expressivas em trechos que conduzem grandes vazões, devido à localização mais à jusante na rede, como as galerias PV11-PV12, PV12-PV14 e PV14-PV6. Vale lembrar que a declividade das galerias é outro fator que interfere nos diâmetros calculados, mas tais valores não foram exibidos na tabela acima, pois o foco é destacar a interferência da redução das vazões sobre os diâmetros.

No geral, a diminuição foi baixa e, tendo em vista que os diâmetros comerciais adotados na área de estudo foram de 600 mm e 800 mm (as tubulações de 400 mm referem-se apenas às ligações entre bocas de lobo e poços de visita), as reduções nas vazões não levaram a uma interferência real no diâmetro das galerias. Portanto, não foram gerados benefícios econômicos para esse aspecto.

6 CONCLUSÃO

Com a execução desse trabalho e com os resultados por ele obtidos, foi possível realizar as seguintes considerações:

As inundações urbanas não foram devidamente contornadas pela drenagem urbana tradicional, na verdade, foram até agravadas por ela. Portanto, faz-se necessária uma transição do modelo atual para um modelo de gestão das águas urbanas que promova a combinação das técnicas clássicas com as técnicas compensatórias, como um mitigador do crescimento urbano.

As inundações, às vezes associadas somente às grandes metrópoles, não se limitam a essas localidades, podendo ser já facilmente percebidas em cidades de pequeno e médio portes, as quais comumente reproduzem padrões errôneos de crescimento típicos dos grandes centros urbanos, obviamente com destaque para a impermeabilização do terreno. Portanto, as políticas de uso e ocupação do solo são uma medida não-estrutural cada vez mais essencial para o combate ao incremento do escoamento superficial nas bacias urbanizadas.

Os pavimentos permeáveis promovem a diminuição do escoamento superficial e, conseqüentemente, da magnitude dos alagamentos e das inundações, ao promoverem a infiltração de uma parcela importante da água das chuvas em áreas onde, muitas vezes, o terreno natural tenha sido significativamente modificado. Além da infiltração, a técnica oferece vários outros benefícios, desde a retenção de poluentes à redução de poças no sistema viário, dentre outras vantagens apontadas na revisão bibliográfica. Dentre os tipos de revestimento possíveis, o concreto poroso se mostrou interessante devido à quantidade de trabalhos anteriores que analisaram as condições de permeabilidade e resistência do material.

Em novos loteamentos, a possibilidade de emprego de pavimentação permeável e outras técnicas compensatórias é facilitada em comparação a bairros já consolidados e bem adensados. Comprovando a viabilidade técnica dos pavimentos permeáveis, a partir do diagnóstico da área e de estudos técnicos específicos, eles podem ser incorporados ao projeto de drenagem do bairro e dimensionados através de metodologias disponíveis na literatura sem maiores dificuldades.

O Bairro Residencial Boa Vista mostrou-se adequado à instalação de pavimentos permeáveis. Com a seleção dos trechos de vias mais compatíveis, o dimensionamento dos dispositivos resultou em valores de espessura da camada reservatório contidos no intervalo de 38,1 cm a

74,2 cm, abaixo do limite usual de 80 cm encontrado na literatura. O tempo de retorno utilizado foi de 5 anos, acima do tempo de retorno geralmente recomendado, de 2 anos. Por esses motivos, constatou-se o caráter conservador do dimensionamento, o qual poderia abranger chuvas de maior intensidade ou maiores bacias de contribuição. Porém, é importante lembrar que o aumento da altura do reservatório acarretaria em maiores custos.

Houveram boas reduções no escoamento superficial, tanto por trecho (de 83,3%) quanto por boca de lobo (de 11,9% a 83,3%) e pela área 1 inteira (14,3%). Quando a escala de análise foi o bairro em sua totalidade, a redução da vazão de saída foi modesta (4,2%), tendo em vista que a quantidade de trechos com pavimentação permeável foi também pouco expressiva frente à área total das ruas do loteamento.

Logo, para que os pavimentos permeáveis tenham um efeito de atenuação das vazões mais expressivo, é necessário distribuí-los em vários trechos ao longo de todo o bairro, preferencialmente combinados com outras técnicas compensatórias nos pontos menos favoráveis, como aqueles de grande declividade. Assim, esses dispositivos proporcionariam folgas ainda mais significativas à rede de microdrenagem, a partir de maiores reduções nos escoamentos superficiais.

A redução das vazões conduzidas pelas galerias subterrâneas levou a reduções baixas nos diâmetros calculados das tubulações, variando de 2,9% a 5,6%. Tais reduções não permitiram a adoção de diâmetros comerciais menores, o que é uma proposição comum em outros estudos que analisam a diminuição dos escoamentos.

Ficou claro que esse trabalho tratou da viabilidade sob o ponto de vista técnico, principalmente devido à limitação de tempo para sua execução, mas é importante lembrar que uma análise da viabilidade geral envolve também critérios econômicos, sendo igualmente fundamental para a aplicação dos pavimentos permeáveis. Portanto, fica como sugestão para estudos futuros a inclusão dessa parcela na análise para uma conclusão quanto à viabilidade global.

Com o que foi exposto, é justo afirmar que os objetivos propostos no início da monografia foram cumpridos. Além disso, sugere-se para outros alunos a realização de estudos semelhantes, com pavimentos permeáveis, de concreto ou outro material, ou com outras técnicas compensatórias, de infiltração ou armazenamento, a fim de ampliar os conhecimentos

e permitir a comparação de resultados entre diferentes pesquisas, avaliando as peculiaridades de cada técnica e de cada área de estudo.

Para finalizar, acredita-se que maiores mudanças, tidas como essenciais para o alcance de uma drenagem urbana mais sustentável, não estejam assim tão distantes. E, para acelerar esse processo, os profissionais formados em engenharia ambiental e sanitária, atuando ao lado dos demais agentes responsáveis pelo planejamento e pela gestão das águas urbanas, são elementos de grande importância.

Assim, é indispensável que os cursos de graduação (engenharia ambiental, engenharia civil, entre outros) abordem e incentivem o aprofundamento dessa temática pelos estudantes, para que cada vez mais sejam formados profissionais com valores alinhados à filosofia preconizada pela drenagem urbana sustentável, de prevenção ao invés de transferência do problema para jusante. Ressalta-se ainda que quando se trata de sustentabilidade no meio urbano, a drenagem é apenas um entre vários setores que necessitam de ajustes. O caminho é longo, mas existente.

7 REFERÊNCIAS

ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), Projeto técnico. Microrreservatórios. Soluções para Cidades. 2013. Disponível em https://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/09/AF_Microreservat%c3%b3rios_web.pdf. Acesso em: 28 set. 2013.

Após destruição com chuvas, Belo Horizonte proíbe canalização de córregos. **DomTotal**, Belo Horizonte, 05 janeiro 2020. Disponível em: <<https://domtotal.com/noticia/1420407/2020/02/apos-destruicao-com-chuvas-belo-horizonte-proibe-canalizacao-de-corregos/>>. Acesso em: 3 nov. 2020.

ARAÚJO, Paulo Roberto de; TUCCI, Carlos EM; GOLDENFUM, Joel A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Braz. J. Water Resour.**, v. 5, n. 3, p. 21-29, 2000.

BAPTISTA, Márcio; NASCIMENTO, Nilo; BARRAUD, Sylvie. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. Porto Alegre: ABRH, 2005. 266 p.

BARDINI, Vivian Silveira dos Santos. **Estudo de viabilidade técnica da utilização de cinzas da queima da casca de Pinus em obras de pavimentação asfáltica**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BATEZINI, Rafael. **Estudo preliminar de concretos permeáveis como revestimento de pavimentos para áreas de veículos leves**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BATEZINI, R; BALBO, J. T. Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, v. 8, n. 3, p. 248-259, 2015.

BECKER, N., & 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, 11, e20180009. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.002.AO07>

BENINI, S. **Infraestrutura verde como prática sustentável para subsidiar a elaboração de planos de drenagem urbana: estudo de caso da cidade de Tupã/SP**. 2015. 2020 f. Tese (doutorado em geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente/SP, Presidente Prudente, 2015.

BORGES, Hellen Heloyze dos Santos; AGUIAR, Wagner Mendonça Alves; ZAMPIERI, Jéssica Nathália Florêncio. A utilização do telhado verde na construção civil como alternativa para diminuição dos impactos ambientais. **Interfaces do Conhecimento**, v. 1, n. 1, 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. MMA em foco: Agenda Ambiental Urbana. 2020. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/component/k2/item/15742-mma-em-foco-agenda-ambiental-urbana.html>>. Acesso em: 12 abr. 2020.

CALLEJAS, Ivan Julio Apolônio; DURANTE, Luciane Cleonice; ROSSETI, Karyna de Andrade Carvalho. Pavimentação Asfáltica: Contribuição no Aquecimento de Áreas Urbanas. **E&S Engineering and Science**, v. 3, n. 1, p. 64-72, 2015.

Chuva provoca deslizamentos e inundações em Divinópolis, MG. **G1**, 02 janeiro 2012. Disponível em: <http://g1.globo.com/minas-gerais/triangulo-mineiro/noticia/2012/01/chuva-provoca-deslizamentos-e-inundacoes-em-divinopolis-mg.html>. Acesso em: 11 nov. 2020.

Conceitos e requisitos para pavimento intertravado permeável. **Soluções para cidades**, 27 agosto 2020. Disponível em: <https://www.solucoesparacidades.com.br/saneamento/pr2-conceitos-e-requisitos-para-pavimentos-intertravado-permeavel/>. Acesso em: 14 set. 2020

CRUZ, Marcus A. S.; SOUZA, Christopher Freire; TUCCI, Carlos E.M. controle da drenagem urbana no brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo, n. 51, p.1-18, nov. 2007.

Defesa Civil alerta população ribeirinha sobre nível do Rio Itapecerica que subiu com as chuvas em Divinópolis. **G1**, 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/centro-oeste/noticia/2019/12/12/defesa-civil-alerta-populacao-ribeirinha-sobre-nivel-do-rio-itapecerica-que-subiu-com-as-chuvas-em-divinopolis.ghtml>. Acesso em: 11 nov. 2020.

DIVINÓPOLIS. In: IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/divinopolis/panorama>. Acesso em: 11 nov. 2020.

FARIA, A. C.; SANTANA, J. G.; BARBOSA, J. M.; DONATO, M. Pavimento de concreto drenante: estudo da granulometria que favorece a drenagem e que afete o mínimo na resistência. In: 33º CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE DA ANPET, 2019, BALNEÁRIO CAMBORIÚ.

FEAM (Fundação Estadual do Meio Ambiente). Aproveitamento de água pluvial: conceitos e informações gerais. Minas Gerais, 2016. Disponível em: http://feam.br/images/stories/2016/PRODUCAO_SUSTENTAVEL/GUIAS-TECNICOS-AMBIENTAIS/CARTILHA_AGUA_DA_CHUVA_INTRANET.pdf. Acesso em: 25 out. 2020.

FILENI, Felipe de Mendonça; COSTA, Maria Elisa Leite; ALVES, Conceição de Maria Albuquerque. The application of LIDs in Savanna region for mitigation of flooded areas. RBRH, Porto Alegre , v. 24, e40, 2019 . Available from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312019000100240&lng=en&nrm=iso. access on 23 Feb. 2021. Epub Oct 17, 2019. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180177>.

FRITZEN, Maycon; BINDA, Andrey Luis. Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidade, hidrologia e impactos no ambiente. **Ateliê Geográfico**, v. 5, n. 3, p. 239-254, 2011.

FUNEDI. **Plano diretor participativo de Divinópolis**. Divinópolis, 2013. Disponível em: <https://planodiretordedivinopolis.wordpress.com/author/planodiretordedivinopolis/>. Acesso em: 16 mar. 2021.

GUEDES, Hugo Alexandre Soares. **Microdrenagem**. Pelotas: UFPEL, 2019. 85 slides, color. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/hugoguedes/files/2019/10/Microdrenagem.pdf>. Acesso em: 15 set. 2020.

HENTGES, Sara Ceron; TASSI, Rutinéia. efeito do uso de microrreservatório na redução dos diâmetros das redes de microdrenagem. **Revista de Arquitetura Imed**, Passo Fundo, v. 2, n. 1, p.10-18, nov. 2013.

Já são 55 as mortes provocadas pelas chuvas em Minas Gerais. **G1 Minas**, Belo Horizonte, 29 de jan. de 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/01/29/ja-sao-55-as-mortes-provocadas-pelas-chuvas-em-minas-gerais.ghml>>. Acesso em: 15 de nov. de 2020.

Divinópolis decreta emergência com rio 7 metros acima do normal. **Estado de Minas**, 18 de dez. de 2008. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2008/12/18/interna_gerais,92578/divinopolis-decreta-emergencia-com-rio-7-metros-acima-do-normal.shtml>. Acesso em 25 de mar. de 2021.

JUNIOR, Lourenço Leme da Costa; BARBASSA, Ademir Paceli. Parâmetros de projeto de microrreservatório, de pavimentos permeáveis e de previsão de enchentes urbanas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 46-54, 2006.

KIPPER, Alex. Drenagem urbana: comparativo de custos no dimensionamento utilizando sistemas de drenagem tradicional (higienista), e compensatória com microrreservatórios. **Trabalho de conclusão de curso**. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2015.

LEITE, Bruna Pereira; FUJIMURA, Jéssika Mayumi; FERNANDES, Jhenifer Stéfani de Araújo. Avaliação dos impactos na drenagem com a implantação de telhados verdes na UFMT–Campus Cuiabá utilizando o software SWMM. **Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, v. 6, p. 354-363, 2016.

LUCAS, A; SOBRINHA, L; MORUZZI, R.; BARBASSA, A. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 17-28, 2015.

MELO, Tássia dos Anjos Tenório de et al. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p.147-165, out./dez. 2014

MIGUEZ, Marcelo Gomes; VERÓL, Aline Pires; REZENDE, Osvaldo Moura. **Drenagem urbana: do projeto tradicional à sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. 366 p.

MORAES, Alexandre Perri de. Procedimentos Técnicos de Dimensionamento da Microdrenagem do Município de Santo André. In: XIX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento. 2015, Poços de Caldas – MG. Disponível em:

<http://www.trabalhosasemae.com.br/sistema/repositorio/2015/1/trabalhos/99/118/t118t4e1a2015.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2020.

MOTTA, L. **Procedimentos de projeto viário em pavimentos permeáveis com base na ABNT NBR 16.416:2015 – comparação entre blocos permeáveis e convencionais**. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

NASCIMENTO, Bruno Warley Leandro et al. **Estudo de flebotomíneos (diptera: psychodidae) no município de Divinópolis, Minas Gerais, Brasil**. 2013. Tese de Doutorado.

NETO, Paulino de Almeida et al. **Análise dos componentes do balanço hídrico em uma bacia urbana experimental**. 2004.

NIGRI, I. **Pavimentos permeáveis de concreto – requisitos gerais de projeto estabelecidos pela norma ABNT NBR 16416:2015**. 2017. 45 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

NOVAS ÁRVORES POR AÍ. **Jardim de chuva**. São Paulo, [2020?]. Disponível em: <http://novasarvoresporai.com.br/jardim-de-chuva/>. Acesso em 30 out. 2020.

PARRA, G. G., & TEIXEIRA, B. A. N. (2020). Análise de cenários resultantes da impermeabilização de espaços destinados à circulação e permanência de pedestres. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 12, e20190265. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190265>

Pavimentos permeáveis prometem diminuir significativamente as inundações urbanas. **Engenharia 360**, 21 abril 2020. Disponível em: <https://engenharia360.com/pavimentos-permeaveis-reduz-inundacoes/>. Acesso em: 12 set. 2020.

PBH. **Resiliência urbana**. Belo Horizonte, 01 mar. 2021. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/politica-urbana/informacoes/resiliencia-urbana>. Acesso em: 12 abr. 2021.

PINTO, Liliane Lopes Costa Alves. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

POSSAS, Marcelo. Ciclo Hidrológico. **Fonte Hídrica**. 2 de nov. de 2011. Disponível em: <http://fontehidrica.blogspot.com/2011/11/ciclo-hidrologico.html>. Acesso em: 10 de out. de 2020.

Possibilidade de chuva intensa deixa Defesa Civil em alerta em Divinópolis. **Portal Gerais**, 23 janeiro 2020. Disponível em: <https://portalgerais.com/possibilidade-de-chuva-intensa-deixa-defesa-civil-em-alerta-em-divinopolis/>. Acesso em: 11 nov. 2020.

PronaSolos entrega maior plataforma tecnológica do país sobre solos brasileiros. **EMBRAPA**, 2020. In: EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/57903146/pronasolos-entrega-maior-plataforma-tecnologica-do-pais-sobre-solos-brasileiros>. Acesso em: 06 mar. 2021.

PRONASOLOS. In: PRONASOLOS: Programa Nacional de Solos do Brasil. Disponível em: <http://pronasolos.agenciazetta.ufla.br/curiosidades>. Acesso em: 06 mar. 2021.

RAMOS, Carlos Lloret et al. Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo. 1999.

REIS, R. P. A.; ILHA, M. S. de O. Comparação de desempenho hidrológico de sistemas de infiltração de água de chuva: poço de infiltração e jardim de chuva. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 79-90, abr./jun. 2014.

REIS, Ricardo Prado Abreu; OLIVEIRA, Lúcia Helena de; SALES, Maurício Martinés. Sistemas de drenagem na fonte por poços de infiltração de águas pluviais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p.99-117, abr./jun. 2008.

SILVA, Jhonata Fernandes Ferreira. **Alternativas para controle de alagamentos urbanos utilizando telhados verdes e pavimentos permeáveis em um bairro da cidade do Recife**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SILVEIRA, ALL da; GOLDENFUM, Joel Avruch. Metodologia generalizada para pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 157-168, 2007.

SOLUÇÕES PARA CIDADES. **Projeto técnico: jardins de chuva**. 2020. Disponível em: https://www.solucoesparacidades.com.br/wp-content/uploads/2013/04/AF_Jardins-de-Chuva-online.pdf. Acesso em: 10 set. 2020.

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. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p. 9-18, 2012.

SUDERHSA. Manual de Drenagem Urbana: Região Metropolitana de Curitiba/PR. p. 150, 2002.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; PICCILLI, D. G. A.; PERSCH, C. G. Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 139-154, jan./mar. 2014.

TAVANTI, Débora Riva; BARBASSA, Ademir P. Análise dos desenvolvimentos urbanos de baixo impacto e convencional. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 17-28, 2012.

TEIXEIRA, Luan Honório Brasil; ARAUJO, Otavio Correia Campos. Estudo das Vantagens do Asfalto-borracha em Relação ao Asfalto Convencional. 2018.

TOMINAGA, Erika Naomi de Souza. **Urbanização e cheias: medidas de controle na fonte**. 2013. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 5-27, jan./mar. 2002.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH, 2007. 393 p.

TUCCI, Carlos EM; BERTONI, Juan Carlos. **Inundações urbanas na América do Sul**. Ed. dos Autores, 2003.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Plano diretor de drenagem urbana: manual de drenagem urbana. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.