



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

PROPOSTAS DE MEDIDAS DE CONTROLE DE INUNDAÇÃO NA  
SUB-BACIA DO CÓRREGO CACHOEIRINHA, NA REGIÃO NORDESTE DE  
BELO HORIZONTE

GUILHERME LAGES BARBOSA

BELO HORIZONTE  
2018

GUILHERME LAGES BARBOSA

PROPOSTAS DE MEDIDAS DE CONTROLE DE INUNDAÇÃO NA  
SUB-BACIA DO CÓRREGO CACHOEIRINHA, NA REGIÃO NORDESTE DE  
BELO HORIZONTE

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas  
Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro  
Ambiental e Sanitarista.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Luciana Peixoto Amaral

BELO HORIZONTE

2018

BARBOSA, Guilherme Lages.

S---

Propostas de Medidas de Controle de Inundação na Sub-bacia do Córrego Cachoeirinha, na Região Nordeste de Belo Horizonte. - Registro: 2018.

67 f. : il. ; -- cm.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Luciana Peixoto Amaral

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018

1. Medidas de controle. 2. Inundação. 3. Pavimentos permeáveis. 4. Bacia de retenção I. BARBOSA, Guilherme Lages. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Propostas de Medidas de Controle de Inundação na Sub-bacia do Córrego Cachoeirinha, na Região Nordeste de Belo Horizonte.

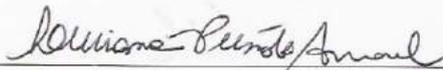
GUILHERME LAGES BARBOSA

PROPOSTAS DE MEDIDAS DE CONTROLE DE INUNDAÇÃO NA  
SUB-BACIA DO CÓRREGO CACHOEIRINHA, NA REGIÃO NORDESTE DE  
BELO HORIZONTE

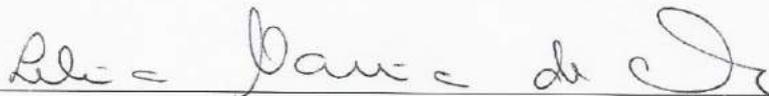
Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Centro Federal de  
Educação Tecnológica de Minas  
Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro  
Ambiental e Sanitarista.

Data de aprovação: 22/06/2018

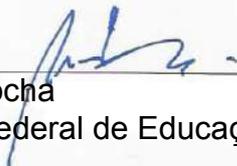
Banca Examinadora:



Luciana Peixoto Amaral – Presidente da Banca Examinadora  
Profa. Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Lilia Maria de Oliveira  
Prof. Dra. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



André Luiz Marques Rocha  
Prof. MSc. do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me guiar ao longo da minha caminhada, por me auxiliar nas dificuldades e pelas bênçãos constantes na minha vida.

À minha avó Lúcia, por ter sempre acreditado em mim, mesmo quando nem eu acreditava.

Aos meus pais e ao meu irmão Bernardo, pelo amor, incentivo e paciência essenciais para o meu crescimento. Por me fornecerem as condições necessárias para que eu pudesse me dedicar aos meus estudos e por investirem no meu potencial. Obrigado por tudo!

Aos meus avós, madrinha Cláudia, tios, tias e primos (Giovanna, Rafaella, Izabella, Arthur e Gabriel), pelo apoio incondicional e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

Aos amigos da vida (Talita, Bruna, Kilcy, Thamires e Taynara), do CEFET (Gabriela, Radieddine, Jéssica, Isabella, Nathália, Thebaldi, Elisa, Débora, Ana, Ítalo, Natália e Marina) e da ASU, por tornarem mais fáceis os momentos de dificuldades e únicos os momentos de alegria.

À equipe de Meio Ambiente e Segurança do Trabalho da RHI Magnesita, especialmente Paula, Fernando, Gilberto e Brígida, por contribuírem significativamente para o meu desenvolvimento profissional.

À minha orientadora Prof. Dra. Luciana Peixoto, pelo precioso apoio, disponibilidade e dedicação prestados ao longo, não só desse trabalho, mas da vida acadêmica. O seu auxílio foi imprescindível!

À Débora Dutra, por toda a ajuda no processo de desenvolvimento dos mapas e informações de SIG do trabalho.

Por fim, ao CEFET-MG e aos professores do Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, pelo aprendizado e contribuição na minha formação acadêmica.

## RESUMO

GUILHERME LAGES BARBOSA, Propostas de Medidas de Controle de Inundação na Sub-bacia do Córrego Cachoeirinha, na Região Nordeste de Belo Horizonte. 2018. 67 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

Este trabalho tem como objetivo propor medidas de controle estruturais visando diminuir os efeitos das inundações que ocorrem no córrego Cachoeirinha localizado na região Nordeste da cidade de Belo Horizonte. Com base em um mapa de inundação previamente elaborado para a região, identificou-se os locais mais afetados por esses eventos. Com o auxílio de softwares de georreferenciamento, foi possível verificar que um dos pontos mais atingidos pelas inundações da região é o encontro das avenidas Bernardo Vasconcelos e Cristiano Machado. Assim, propôs-se uma medida estrutural que minimize os efeitos das inundações em cada uma das avenidas. Devido ao alto nível de urbanização e, conseqüentemente, impermeabilização da área, a possibilidade de uso de diferentes medidas de controle é limitada. Assim, com uso de imagens de satélite fornecidas pelo software Google Earth, para a avenida Cristiano Machado, propôs-se o uso de pavimentos permeáveis nos estacionamentos do Minas Shopping e Supermercado Extra. Para a avenida Bernardo Vasconcelos, sugeriu-se a construção de uma bacia de retenção no Parque Ecológico Renato Azeredo, localizado, em paralelo, a algumas ruas de distância da avenida em questão. Para ambas propostas, a vazão foi calculada por meio do Método Racional. Já para o pré-dimensionamento, utilizou-se cálculos recomendados específicos para cada medida de controle. Com o suporte do software ArcMap 10.2 foi possível obter informações essenciais para desenvolver os cálculos citados, tais como áreas, comprimentos e diferenças de níveis de altitude. Com base em resultados previamente obtidos na literatura, onde foram utilizadas medidas similares, concluiu-se que tais medidas estruturais, combinadas com o uso de medidas não-estruturais, têm a capacidade de amenizar os efeitos das inundações na área estudada, precavendo e reduzindo possíveis prejuízos.

Palavras-Chave: Medidas de controle. Inundação. Pavimentos permeáveis. Bacia de retenção.

## **ABSTRACT**

GUILHERME LAGES BARBOSA, Proposals for Flood Control Measures in the Cachoeirinha Stream Sub-basin, in the Northeast Region of Belo Horizonte. 2018. 67 f. Monograph (Graduate) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

This work aims to propose structural control measures to reduce the effects of floods occurring in the Cachoeirinha stream located in the Northeast region of the city of Belo Horizonte. Based on a flood map, previously prepared for the region, the sites most affected by these events were identified. With the help of georeferencing software, it was possible to verify that one of the most affected site by floods in the region is the meeting of Bernardo Vasconcelos and Cristiano Machado avenues. Thus, a control measure was proposed to minimize the effects of the floods for each of the avenues. Due to the high level of urbanization and, consequently, waterproofing of the area, the possibility of using different control measures is limited. This way, using satellite images provided by Google Earth software, for Cristiano Machado avenue, the use of permeable pavements was proposed in the parking lots of Minas Shopping and Extra Supermarket. For Bernardo Vasconcelos Avenue, it was suggested the construction of a retention basin in the Renato Azeredo Ecological Park, located in parallel, some streets away from the avenue. For both proposals, the flow was calculated using the Rational Method. For the pre-sizing, it was used specific recommended calculations for each control measure. With the support of ArcMap 10.2 software it was possible to obtain essential information to develop the cited calculations, such as areas, lengths and differences in altitude levels. It was concluded that such structural measures, combined with the use of non-structural measures, have the capacity to mitigate the effects of flooding in the studied area, preventing and reducing possible losses.

Keywords: Control measures. Flood. Permeable pavements. Retention basin.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> – Série histórica de inundações e precipitações médias mensais entre as décadas de 1960 e 1990 na cidade de Belo Horizonte – MG.....	8
<b>FIGURA 2</b> – Evolução populacional x Ocorrências de inundações entre as décadas de 1960 e 1990 na cidade de Belo Horizonte – MG.....	9
<b>FIGURA 3</b> – Mapa hipsométrico de Belo Horizonte.....	10
<b>FIGURA 4</b> – Seções transversais dos pavimentos permeáveis.....	14
<b>FIGURA 5</b> – Classificação das bacias de retenção quanto a estrutura física.....	19
<b>FIGURA 6</b> – Suscetibilidade a inundações da região Nordeste de Belo Horizonte/MG.....	28
<b>FIGURA 7</b> – Sub-bacias da região Nordeste de Belo Horizonte.....	28
<b>FIGURA 8</b> – Inundações ocorridas em fevereiro de 2018 na sub-bacia 4.....	29
<b>FIGURA 9</b> – Imagem de satélite da sub-bacia 4 na região Nordeste de Belo Horizonte.....	30
<b>FIGURA 10</b> – Localização do Parque Ecológico Renato Azeredo e ponto de contribuição da sub-bacia para a bacia de retenção.....	35
<b>FIGURA 11</b> – Curvas de nível na região nos estacionamentos do Minas Shopping e Supermercado Extra.....	39
<b>FIGURA 12</b> – Inundação em frente ao Minas Shopping em fevereiro de 2018.....	40
<b>FIGURA 13</b> – Estacionamento do Minas Shopping.....	41
<b>FIGURA 14</b> – Estacionamento do Supermercado Extra.....	41
<b>FIGURA 15</b> – Área de aplicação dos pavimentos permeáveis.....	42
<b>FIGURA 16</b> – Dimensões do pavimento permeável nos estacionamentos do Minas Shopping e Supermercado Extra.....	45
<b>FIGURA 17</b> – Espaço de lazer do Parque Ecológico Renato Azeredo.....	46
<b>FIGURA 18</b> – Espaço de lazer do Parque Ecológico Renato Azeredo.....	46
<b>FIGURA 19</b> – Localização da bacia de retenção pré-dimensionada na área de estudo.....	49

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 1</b> – Medidas não-estruturais para controle de inundações urbanas.....	12
<b>QUADRO 2</b> – Resultados das simulações de chuva em diferentes superfícies.....	15
<b>QUADRO 3</b> – Taxa média de redução de escoamento superficial do pavimento permeável em relação ao pavimento asfáltico.....	16
<b>QUADRO 4</b> – Comparação entre pavimentos com diferentes revestimentos.....	16
<b>QUADRO 5</b> – Classificação e descrição das bacias de retenção.....	19
<b>QUADRO 6</b> – Porcentagem de redução da concentração de poluentes para a bacia de detenção monitorada.....	20
<b>QUADRO 7</b> – Coeficiente de escoamento superficial.....	24
<b>QUADRO 8</b> – Valores de área de acordo com a classificação da declividade (IBGE) na Região Nordeste de Belo Horizonte.....	26
<b>QUADRO 9</b> – Quantis adimensionais de frequência.....	31
<b>QUADRO 10</b> – Valores de intensidade da chuva.....	36
<b>QUADRO 11</b> – Valores de precipitação.....	37
<b>QUADRO 12</b> – Tempo de concentração da sub-bacia 4.....	37
<b>QUADRO 13</b> – Valores de intensidade da chuva para $t_c = 94$ min.....	37
<b>QUADRO 14</b> – Valores de precipitação para $t_c = 94$ min.....	38
<b>QUADRO 15</b> – Profundidades dos pavimentos permeáveis para diferentes durações.....	43
<b>QUADRO 16</b> – Tempo de concentração até o ponto X.....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Estacion. – Estacionamento

DCTA – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDF – Intensidade – Duração – Frequência

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

SCS – *Soil Conservation Service*

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

USGS – *United States Geological Survey*

ZEIS – Zona Especial de Interesse Social

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Definição do Problema.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objetivo Geral.....	3
1.3.1 Objetivos Específicos.....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Urbanização.....	4
2.2 Enchentes e Inundações.....	5
2.2.1 Inundações de Áreas Ribeirinhas.....	7
2.2.2 Inundações em Razão da Urbanização.....	7
2.3 Inundações em Belo Horizonte.....	8
2.4 Regiões Administrativas da Cidade de Belo Horizonte.....	10
2.5 Medidas de Controle.....	11
2.5.1 Medidas Estruturais.....	11
2.5.2 Medidas Não-estruturais.....	12
2.6 Pavimentos Permeáveis.....	13
2.7 Bacia de Retenção.....	17
2.8 Tecnologias de Geoprocessamento.....	21
2.9 Hidrologia.....	22
2.9.1 Hidrograma.....	22
2.9.2 Método Racional.....	23
2.9.3 Distribuição Temporal das Chuvas.....	25
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
3.1 Escolha e Caracterização da Área de Estudo.....	26
3.2 Modelo Chuva-Vazão.....	30
3.3 Medidas de Controle.....	32
3.3.1 Pavimentos Permeáveis.....	32
3.3.2 Bacia de Retenção.....	34
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>36</b>
4.1 Modelo Chuva-Vazão.....	36
4.2 Pavimentos Permeáveis.....	39
4.3 Bacia de Retenção.....	45
4.4 Redução de Volume de Chuva.....	49
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>51</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>53</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Definição do Problema

A aceleração do desenvolvimento urbano se deu a partir da segunda metade do século XX, onde as populações começaram a se concentrar cada vez mais em espaços menores, resultando na competição por solo e água e, conseqüentemente, na destruição da biodiversidade. Devido à essa aceleração, 83% da população do Brasil mora em regiões urbanas, caracterizando-o como um país fundamentalmente urbano (TUCCI, 2008).

Como consequência do processo de urbanização, a ocorrência de enchentes e inundações se tornou mais frequente. Uma enchente ocorre quando as águas de um rio se elevam até a altura máxima de suas margens, porém, sem transbordar para as regiões próximas. Quando o transbordamento ocorre, trata-se de uma inundação (GOERL e KOBIYAMA, 2005).

De acordo com Tucci (2008), as áreas urbanas estão sujeitas a dois processos envolvendo o escoamento pluvial que podem produzir inundações e impactos. O primeiro deles são as inundações de áreas ribeirinhas que são inundações naturais que ocorrem quando o escoamento dos rios atinge o leito maior, superando o leito menor. Normalmente, essas áreas são ocupadas pela população devido à variabilidade temporal e espacial tanto da precipitação quanto do escoamento na bacia hidrográfica em questão. O segundo processo são as inundações em razão da urbanização. Além de se tornarem mais frequentes devido à urbanização, a magnitude das enchentes também aumentou. Conseqüentemente, a impermeabilização do solo, canalização e obstruções do escoamento causam inundações mais frequentes, sobrecarregando os sistemas de drenagem existentes.

Dentre todos os desastres naturais, a inundação é o mais avassalador, abrangente e frequente, provocando perdas econômicas, ambientais e sociais significativas devido aos danos causados a cidades, rodovias, infraestrutura e agricultura, atingindo um número alto de pessoas. As inundações podem ser responsabilizadas por 55% dos desastres ocorridos e por 72,5% das perdas econômicas mundiais (SAUSEN e LACRUZ, 2015).

Ao longo dos anos, soluções para os problemas com inundações foram

tomadas, porém, em sua grande maioria, apresentam cunho local. As obras feitas ao longo dos córregos apenas reduzem os prejuízos nas áreas em questão, transferindo o agravamento das inundações para jusante. Regiões metropolitanas brasileiras, como Belo Horizonte, São Paulo e Rio de Janeiro, estão sujeitas a inundações frequentes e altamente graves, o que evidencia a urgência de novas medidas estruturais e não-estruturais para mitigar esse problema. Ao passo que nos países desenvolvidos as problemáticas de drenagem urbana têm mais ênfase na qualidade da água coletada, uma vez que boa parte dos seus problemas com inundações já foi resolvida por meio de medidas estruturais; no Brasil, as ações tomadas têm como principal objetivo o controle quantitativo das enchentes (CANHOLI, 2014).

## **1.2 Motivação**

Alguns dos principais problemas referentes à infraestrutura e urbanização em países em desenvolvimento são a elevada concentração da população em áreas menores; aumento da periferia nas cidades; ocupação de áreas de risco de inundações e de escorregamento, podendo resultar em mortes durante os períodos de chuva. No Brasil, só em janeiro de 2004, 84 pessoas morreram devido a eventos que envolviam inundações. Um dos motivos que justifica esses números é o fato de que, durante os períodos chuvosos, os rios saem do seu leito menor e passam a ocupar o leito maior, um processo natural. Entretanto, uma vez que isso não ocorre de maneira regular ao longo dos anos, a população tende a ocupar parte do leito maior, se colocando a mercê dos efeitos das inundações (TUCCI, 2005).

As obras feitas ao longo dos canais, tais como canalização, não são eficientes, uma vez que elas visam somente aumentar a velocidade do escoamento e escoar a água o mais rapidamente. Conseqüentemente, os problemas são transferidos para as regiões a jusante da bacia, o que potencializa a magnitude e frequência das inundações. Assim, faz-se necessário o planejamento de ações preventivas e/ou corretivas a fim de controlar as inundações e integrar as medidas adotadas ao planejamento urbano (CANHOLI, 2014).

As inundações não podem ser totalmente controladas pelo homem. O que se pode fazer é procurar minimizar os seus efeitos e conseqüências. O controle parcial da inundação pode ser alcançado através da combinação de medidas estruturais e não-estruturais, permitindo às populações ribeirinhas reduzirem suas perdas e

mantendo uma convivência harmônica com o rio. As ações aplicáveis envolvem medidas tanto de engenharia quanto de aspecto social. A procura pela otimização dessas ações corresponde ao planejamento da proteção contra inundações e seus possíveis efeitos (TUCCI, 2005).

### **1.3 Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo principal propor medidas estruturais de controle de inundações que ocorrem no córrego Cachoeirinha, localizado na Região Nordeste da cidade de Belo Horizonte - MG.

#### **1.3.1 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos, têm-se:

- Caracterizar a área de estudo e identificar os pontos de inundação;
- Determinar a distribuição temporal da chuva de projeto e estimativa da vazão de projeto por meio de estudo hidrológico;
- Propor medidas de controle que minimizem os eventos de inundação recorrentes na área estudada.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Urbanização

A concentração de pessoas e atividades de produção em um espaço limitado, consequência de um processo de urbanização, estabelece uma relação muito direta com o meio ambiente, uma vez que impactos sinérgicos e persistentes de degradação serão necessariamente gerados. Apesar de haver outras atividades com potencial de causar impactos ambientais tão significativos quanto à urbanização, esta merece uma atenção maior, pois pode gerar impactos concentrados e disseminá-los além dos limites urbanos (JATOBÁ, 2011).

Desastres naturais vêm se tornando cada vez mais comuns em áreas urbanas à medida que o processo de urbanização se acelera. Conseqüentemente, os danos causados são cada vez maiores, tanto em extensão quanto em severidade, conforme as cidades e a população crescem. Ainda que a alta concentração de pessoas nas cidades reduziu significativamente a pressão sob os ecossistemas naturais, uma vez que o território natural exigido para comportar a mesma população é bem menor, não é apenas a superfície terrestre ocupada que influencia nos impactos ambientais causados por uma população urbana. O padrão de consumo e a geração de rejeitos têm potencial de impactar uma parcela significativa de recursos naturais (JATOBÁ, 2011).

Segundo Jatobá (2011), nos países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, apesar da urbanização estar diretamente associada à degradação ambiental e social, a possibilidade de se reverter o quadro é maior. O grande número de habitantes nas cidades favorece a concentração econômica, onde haverá mais oportunidades de emprego, melhor educação e acesso mais fácil a serviços de saúde. Entretanto, quanto maior o grau de urbanização de uma área, maior os riscos de desastres naturais e maior o risco das populações mais pobres serem atingidas por eles. Esses riscos são acentuados quando a urbanização ocorreu de forma precária, sem um devido planejamento prévio (CEPAL, 2008).

A economia brasileira passou por um grande crescimento durante o final do século XIX e início do século XX, trazendo consigo melhores condições de vida, indícios de saneamento e redução de mortalidade com a melhora da saúde pública. A oportunidade de trabalhos assalariados atraiu migrantes nacionais e internacionais,

gerando um mercado interno e comercialização da produção de alimentos. A combinação desses fatores justifica a precocidade do processo de urbanização que aconteceu na região latino-americana (MARTINE e MCGRANAHAN, 2010).

Após a II Guerra Mundial, o movimento da população rural para as áreas urbanas foi fortemente incentivado pela intensificação da industrialização no território nacional. Entretanto, o censo demográfico de 1991 mostrou que houve uma pausa nessa tendência, que até então parecia ser ininterrupta. A diminuição na velocidade do crescimento urbano durou entre as décadas de 80 e 90. Essa mudança no padrão de urbanização pode ser justificada pela crise econômica que atingiu o país na década de 80 e em parte da década de 90, gerando desemprego e pobreza, queda na taxa de fecundidade e desconcentração das atividades de produção (MARTINE e MCGRANAHAN, 2010).

Como consequências de um desenvolvimento urbano sem um planejamento ambiental prévio destacam-se: doenças, poluição atmosférica e sonora, aumento nas temperaturas, contaminação de solo e águas etc. O planejamento urbano brasileiro não considerou os aspectos essenciais para um correto desenvolvimento que, quando ignorados, têm a capacidade de gerar grandes contratempos e custos para o ambiente e para a sociedade (TUCCI, 1997).

Segundo Martine e McGranahan (2010), pode-se dizer que a urbanização no Brasil alcançou um alto nível de maturidade. Contudo, as cidades brasileiras ainda passam por grandes desafios nas esferas social, ambiental e econômica, uma vez que esse processo não aconteceu de maneira harmoniosa. Como consequência, tem-se um quadro no qual a maioria da população de baixa renda vive em habitações inadequadas, se expondo a riscos maiores.

## **2.2 Enchentes e Inundações**

Segundo KOBAYAMA et. al. (2006), inundação é o aumento do nível dos rios além da sua vazão normal, causando o transbordamento das águas nas planícies de inundação, que são as áreas circunvizinhas aos rios sobre as quais as águas extravasam. Quando o rio fica praticamente cheio, porém não há o transbordamento das águas, tem-se uma enchente e não uma inundação. Com o passar dos anos, as inundações têm se tornado cada vez mais frequentes na história da humanidade,

umentando não só o número de ocorrências, mas também o número de pessoas atingidas por esse fenômeno natural. Esse fato pode ser justificado pelas alterações causadas pelo homem, como a forte urbanização desordenada, ocupação de áreas de risco e desmatamento (KOBİYAMA e GOERL, 2005).

A impermeabilização do solo, causada pela construção de estradas, casas, prédios e demais edificações, diminui a infiltração das águas no solo e as direciona para os rios e canais, aumentando o nível d'água rapidamente. Outra causa do aumento das ocorrências de inundações, incrementando o escoamento superficial, acelerando o processo de perda de solo e resultando no assoreamento dos cursos d'água, são os desmatamentos. Além disso, a grande quantidade de resíduos gerada nas cidades obstrui os bueiros, canais e tubulações, que são responsáveis por conduzir as águas pluviais diretamente para o curso d'água, alagando áreas que até então não eram atingidas (KOBİYAMA et. al., 2006).

De acordo com Castro (2003), a Defesa Civil divide as inundações em função da magnitude (excepcionais, de grande magnitude, normais ou regulares e de pequena magnitude) e em função do padrão evolutivo (inundações graduais, inundações bruscas, alagamentos e inundações litorâneas). A grande parte das situações de emergência pública é causada pelas inundações graduais e bruscas.

As inundações graduais ocorrem quando o nível da água aumenta de forma lenta e previsível, mantendo-se em estado de cheia durante um tempo e escoando gradualmente em seguida. Este tipo de inundação possui uma periodicidade e não é tão violenta, apesar de sua área de impacto ser extensa. Já as inundações bruscas, também conhecidas como enxurradas, ocorrem devido a chuvas muito intensas e concentradas. Embora a elevação do nível da água seja imediata e o escoamento intenso, a área de impacto é bem menor do que a das inundações graduais (CASTRO, 2003).

O escoamento pluvial tem a capacidade de produzir inundações e impactos nas áreas urbanizadas através de dois processos principais, que podem acontecer associados ou não. O primeiro deles são as inundações de áreas ribeirinhas que ocorrem naturalmente no leito maior dos rios devido à variabilidade de tempo e espaço da precipitação e do escoamento na bacia hidrográfica. O segundo são as inundações em razão da urbanização que acontecem na drenagem urbana pelo efeito da impermeabilização do solo, canalização ou obstruções do escoamento (TUCCI, 2008).

### 2.2.1 Inundações de Áreas Ribeirinhas

Os rios possuem dois leitos principais, o menor e o maior. O leito menor é por onde a água escoar na maior parte do tempo. Quando as inundações ocorrem é porque o escoamento da água atingiu níveis mais altos que os do leito menor, alcançando o leito maior. A magnitude da inundação, assim como seu risco, é identificada pelas cotas do leito maior. Os impactos ocorrem quando as áreas de leito maior são ocupadas pela população. As inundações de áreas ribeirinhas normalmente acontecem em bacias médias e grandes, ou seja, aquelas com áreas superiores a 100 km<sup>2</sup> (TUCCI, 2008).

Para Tucci (2008), a condição que leva à ocorrência desse tipo de inundação é a falta de limitação quanto à ocupação das áreas de risco de inundação no Plano Diretor. Os anos consecutivos sem relatos de ocorrências levam os empresários a disponibilizarem essas áreas para ocupação urbana; população de classe baixa invadindo áreas ribeirinhas pertencentes ao Poder Público; ocupação de áreas de risco médio e frequência baixa, mas, que quando ocorrem inundações, são atingidas pelo evento.

### 2.2.2 Inundações em Razão da Urbanização

O processo de urbanização traz consigo a impermeabilização do solo, a construção de redes pluviais e possíveis obstruções do escoamento (aterros, pontes etc.), aumentando a frequência e a magnitude das enchentes. As inundações em razão da urbanização normalmente acontecem em bacias pequenas, ou seja, aquelas que possuem áreas inferiores a 100 km<sup>2</sup>, mais constantemente em bacias menores que 10 km<sup>2</sup> (TUCCI, 2008).

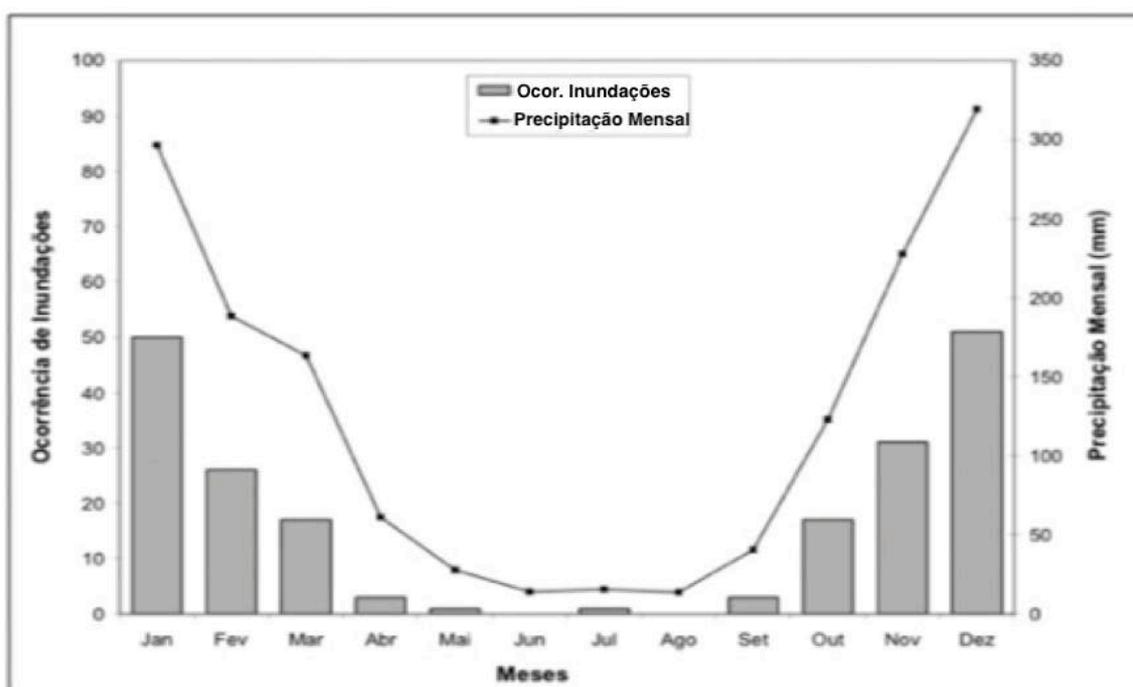
Ainda segundo Tucci (2008), conforme a cidade vai se urbanizando, os seguintes impactos são esperados: aumento nas vazões máximas e da sua frequência devido ao aumento da capacidade de escoamento por meio dos condutos e canais, além das altas taxas de impermeabilização dos solos; aumento na produção de sedimentos devido à falta de proteção das superfícies terrestres e da grande geração de resíduos sólidos; degradação da qualidade das águas devido à lavagem das ruas, transporte de materiais sólidos e ligações indevidas de redes de esgoto doméstico e pluvial; e falta de organização na implantação da infraestrutura urbana.

### 2.3 Inundações em Belo Horizonte

A cidade de Belo Horizonte, localizada na Bacia do São Francisco, é atendida por dois afluentes principais do Rio das Velhas: o Ribeirão Arrudas (atravessando a cidade de oeste para leste) e o do Onça (cortando o município na região Nordeste). A bacia do Ribeirão Arrudas tem uma área de 206,68 km<sup>2</sup>, onde 78,39% (162,02 km<sup>2</sup>) está dentro da cidade de Belo Horizonte. Dessa forma, 48,4% da capital mineira é coberta pela bacia do Ribeirão Arrudas. Já a bacia do Onça tem uma área de 212 km<sup>2</sup>, da qual 78,58% (166,59 km<sup>2</sup>) está dentro de Belo Horizonte. Assim, a bacia do Onça corresponde a 45,56% da área total da capital (CAMPOS, 2011).

Baseando-se em um levantamento de notícias publicadas ao longo dos anos, Champs (2012) conseguiu estabelecer uma relação de causa e efeito entre as chuvas intensas e as inundações que aconteceram em Belo Horizonte. Utilizando os dados pluviométricos registrados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) entre as décadas de 60 e 90, o autor construiu um gráfico (Figura 1) representando a distribuição mensal de chuvas e a ocorrência de inundações na cidade de Belo Horizonte.

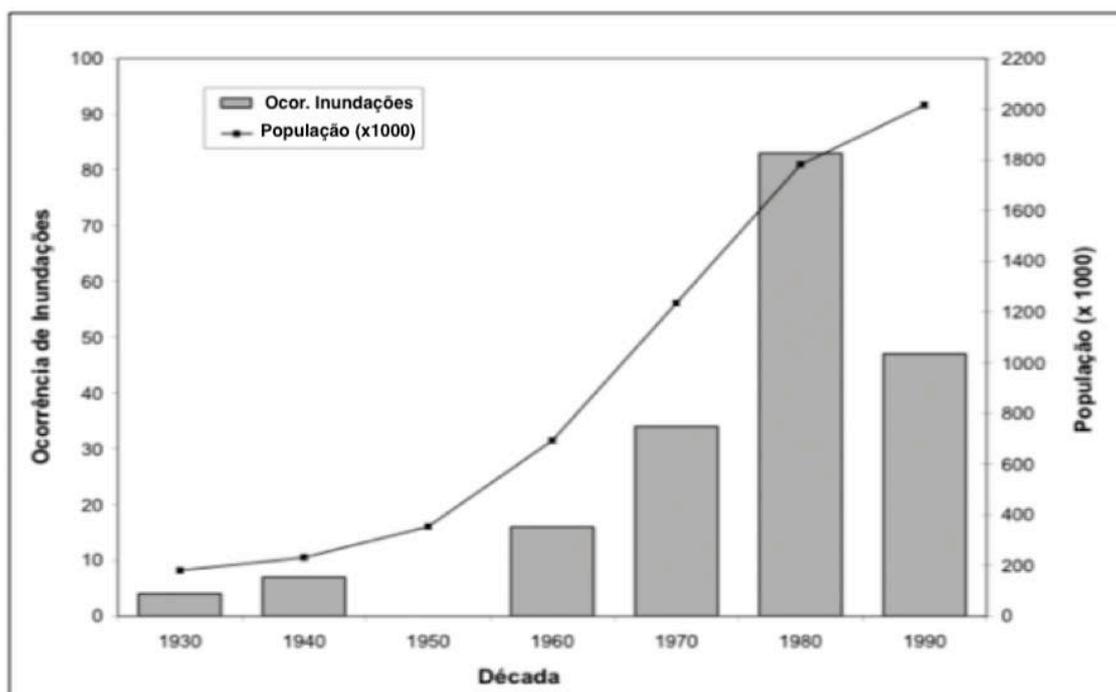
FIGURA 1 - Série histórica de inundações e precipitações médias mensais entre as décadas de 1960 e 1990 na cidade de Belo Horizonte – MG.



Fonte: Adaptado de Champs (2012).

A fim de correlacionar a ocorrência de inundações ao longo dos anos com o desenvolvimento da urbanização, relacionaram-se os registros de inundações com o número de habitantes entre as décadas de 30 e 90, como pode ser visto na Figura 2.

FIGURA 2 - Evolução populacional x Ocorrências de inundações entre as décadas de 1930 e 1990 na cidade de Belo Horizonte – MG.



Fonte: Adaptado de Champs (2012).

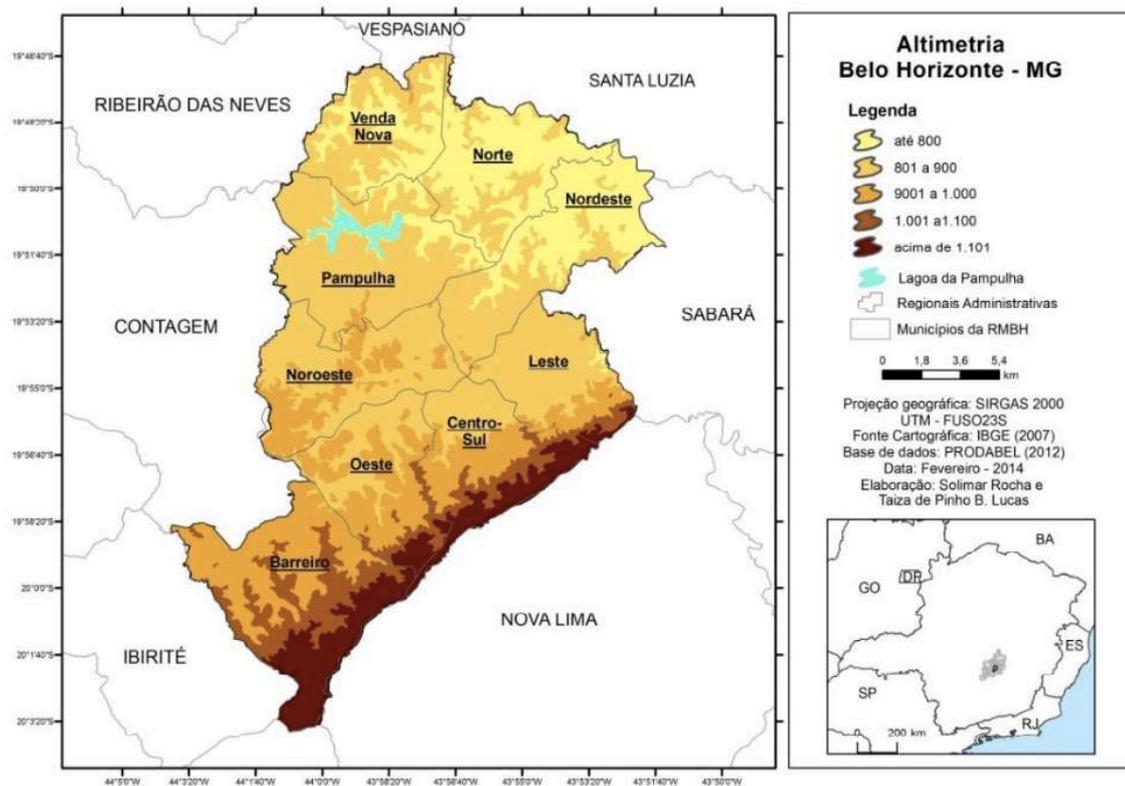
Assim, observa-se que: a) a década com a ocorrência do maior número de inundações foi a de 1980 e, b) 69,5% dos eventos de inundação ocorreram nas duas últimas décadas do século XX. Além disso, percebe-se que a ocorrência das inundações acompanha a evolução da curva populacional (CHAMPS, 2012).

De acordo com o gráfico da Figura 2 pode-se afirmar que ocorreram dois picos de ocorrências de inundações: o primeiro entre 1930 – 1940 e um segundo entre 1960 – 1980. O primeiro pico é justificado por Ramos (1998, *apud* CHAMPS, 2012) pela combinação entre o grande avanço imobiliário que aconteceu na capital mineira no fim da década de 20 com a forte ocupação da zona urbana na década de 30. Já o segundo pico foi devido ao grande crescimento populacional no final da década de 60 e do processo de urbanização. Com o aumento do sistema de drenagem na área central e crescimento da cidade no sentido das regiões periféricas nas décadas de 1980 e 1990, as dificuldades no sistema de drenagem ficaram cada vez mais evidentes (CHAMPS, 2012).

## 2.4 Regiões Administrativas da Cidade de Belo Horizonte

De acordo com Lucas et. al. (2015), todas as regiões administrativas de Belo Horizonte possuem pontos passíveis de alagamentos ou inundações. Os níveis altimétricos variam de 680 m a 1.480 m na cidade. Tais variações colaboram não só para aumentar o escoamento superficial, bem como para potencializar as enchentes e inundações nas áreas mais aplainadas do relevo. As regiões de Venda Nova, Norte e Nordeste são aquelas que apresentam as menores cotas altimétricas, caracterizando-as como as áreas mais aplainadas da cidade. Na Figura 3 é apresentado o mapa hipsométrico da cidade de Belo Horizonte.

FIGURA 3 - Mapa hipsométrico de Belo Horizonte.



Fonte: Lucas et. al. (2015).

As três regiões estão localizadas na bacia do Ribeirão do Onça, a qual possui um número alto de córregos convergentes. Por conta das características hidrológicas desta bacia, tais como um formato mais arredondado e córregos sinuosos em terrenos mais aplainados, o risco dos impactos causados por chuvas e inundações são potencializados. As populações ribeirinhas destas regiões estão mais vulneráveis: na região Norte, pelo número elevado de áreas habitadas; na região Nordeste, pelo

número elevado de ZEIS (Zona Especial de Interesse Social); e, em Venda Nova, pela alta densidade demográfica (LUCAS et. al., 2015).

## **2.5 Medidas de Controle**

O controle de inundações nada mais é que um conjunto de medidas que visam reduzir os riscos aos quais as populações estão expostas, minimizando os prejuízos que podem ser causados pelas inundações e permitindo um desenvolvimento urbano de maneira harmônica, articulada e sustentável (ENOMOTO, 2004).

As medidas de controle de inundação podem ser tanto do tipo estrutural quanto não estrutural. As medidas estruturais fazem modificações no sistema fluvial, o que pode evitar os prejuízos gerados pelas enchentes. Já as medidas não-estruturais procuram reduzir os prejuízos melhorando a convivência dos moradores com as enchentes (TUCCI, 1997).

### **2.5.1 Medidas Estruturais**

As medidas estruturais são, basicamente, obras que envolvem engenharia de custos altos onde se busca a redução do risco das enchentes. Tais medidas podem criar uma falsa ideia de segurança, o que pode levar a ocupação de áreas inundáveis, resultando em danos significativos futuros. As medidas estruturais podem ser extensivas ou intensivas. Medidas extensivas agem diretamente na bacia, buscando alterar a relação precipitação-vazão, por exemplo a alteração da cobertura vegetal, que tem a capacidade de controlar a erosão da bacia, além de diminuir e atrasar os picos de enchentes (TUCCI, 1997). Por sua vez, as medidas estruturais intensivas são aquelas que agem no rio e podem ser classificadas de três formas diferentes: aquelas que podem acelerar o escoamento (ex: diques, aumento da capacidade de descarga dos rios); aquelas que retardam o escoamento (ex: reservatórios, bacias de amortecimento); aquelas que desviam o escoamento (canais, desvios) (SIMONS et. al., 1977 *apud*. TUCCI, 1997).

Apesar das medidas estruturais serem essenciais para que boa parte dos problemas de inundação sejam solucionados, além de serem extremamente caras, elas não trazem isoladamente as soluções eficazes e sustentáveis para os problemas

de drenagem urbana. O mais recomendado é que se trate de maneira mais integrada o ambiente urbano e as relações entre os sistemas que o compõe (ENOMOTO, 2004).

### 2.5.2 Medidas Não-estruturais

As medidas não-estruturais não são elaboradas visando uma proteção completa para a população que habita uma região passível de inundação. Para tal, seria necessário elaborar uma proteção contra a maior enchente possível, o que é física e economicamente inviável. Combinadas ou não com as medidas estruturais, as medidas não-estruturais podem minimizar de maneira significativa os prejuízos com um custo bem mais acessível, uma vez que os custos com medidas estruturais são bem mais altos (TUCCI, 1997).

Como dito anteriormente, as medidas não-estruturais buscam melhorar a convivência da população com as enchentes. Elas podem ser classificadas em: regulamento do uso da terra, construções à prova de enchentes, seguro de enchente, previsão e alerta de inundação (ENOMOTO, 2004). No Quadro 1 são apresentadas algumas medidas não-estruturais.

QUADRO 1 – Medidas não-estruturais para controle de inundações urbanas.

<b>Medida</b>	<b>Características</b>	<b>Objetivos</b>
Plano diretor	Planejamento das áreas a serem desenvolvidas e a densificação das áreas atualmente loteadas.	Evitar ocupação sem prevenção e previsão.
Zoneamento	Conjunto de regras para a ocupação das áreas de maior risco de inundação. É incorporado ao PLANO DIRETOR.	Visa à minimização futura de perdas materiais e humanas em face das grandes cheias.
Controle do desmatamento (BEG e MOHD, 1998)	Além do controle do desmatamento, o reflorestamento deve ser feito em todos locais possíveis.	Prevenir a erosão e o assoreamento.
Educação Ambiental	Para ser realizado junto à população. A conservação das margens dos arroios, sua vegetação típica e taludes são essenciais.	Conscientizar a população que sofre ou poderá sofrer com as inundações.
Medidas de apoio à população (BEG e MOHD, 1998)	Lugares seguros para preservar a pessoa, a família e trabalhos Construção de abrigos temporários, meios de evacuação, patrulhas de segurança.	Inserir nos possíveis atingidos pelas inundações um senso de proteção.
Distribuição de informação sobre as enchentes	Programa de orientação da população sobre as previsões de enchentes para que ela aprenda a se prevenir contra	Aprimorar a qualidade da assistência externa e a reduzir falhas como a

<b>Medida</b>	<b>Características</b>	<b>Objetivos</b>
(BEG e MOHD, 1998).	as cheias.	falta de informações, a má avaliação das necessidades e formas inadequadas de ajuda.
Reassentamento	Reassentamento de residentes ilegais ocupantes das margens de rios, e de residentes legais nas áreas de enchente.	Retirar a população dos locais de risco.
Soluções de mitigação	Promover o aumento das áreas de infiltração e percolação e armazenamento temporário.	Aumentar a eficiência do sistema de drenagem à jusante e da capacidade de controle de enchentes dos sistemas.
Sistema de alerta	Sistema utilizado para prevenir a população com antecedência de curto prazo, em eventos mais raros.	Ajudar no controle das estruturas hidráulicas no sistema do rio, e evitar o pânico.
Construções a prova de enchentes	Pequenas adaptações nas construções.	Reduzir as perdas em construções localizadas nas várzeas de inundação.
Seguro contra enchentes	Proteção econômica contra inundações.	Diminuir os prejuízos individuais causados pelas inundações.
Sistemas hidrológicos	Histórico hidrológico da bacia e modelos que mostram o comportamento hidráulico e hidrológico do sistema do rio.	Fornecer subsídios para os estudos de comportamento da bacia, assim como previsão de cenários futuros.

Fonte: ENOMOTO (2004).

## 2.6 Pavimentos Permeáveis

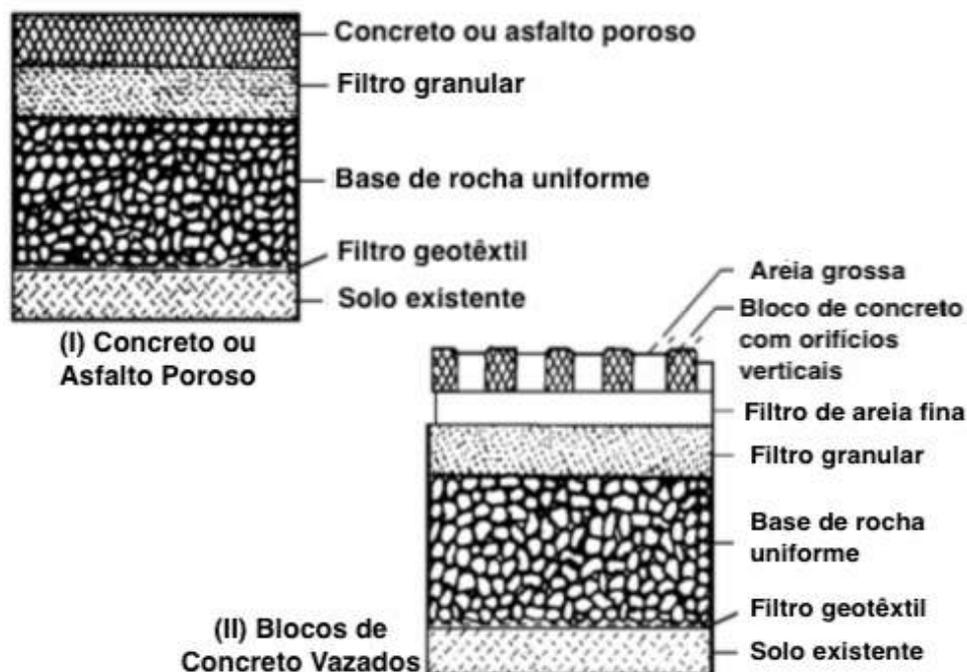
A impermeabilização do solo gerada pelo processo de urbanização, além de alterar o ciclo hidrológico, causa um aumento nas enchentes e urbanas e na degradação da qualidade das águas pluviais. Uma tendência sustentável atual é a manutenção de condições que sejam próximas às de pré-urbanização, através de medidas que permitem a infiltração e retardem o escoamento da água. Dentro dessa perspectiva, os pavimentos permeáveis têm demonstrado um papel importante por reduzirem os volumes de escoamento superficial e o impacto sobre a qualidade da água (GONÇALVES e OLIVEIRA, 2014).

Os pavimentos permeáveis podem ser considerados um tipo de medida de controle para inundações. Urbonas e Stahre (1993, *apud* PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE, 2005) os classificam em três tipos diferentes de acordo com a

sua composição: pavimento de asfalto poroso; pavimento de concreto poroso; e pavimento de blocos de concreto vazado preenchido com material granular.

Os pavimentos porosos, tanto de asfalto quanto de concreto, não possuem em sua mistura a parcela de areia fina, a fim de fazer com que o escoamento infiltre de maneira mais rápida pelo revestimento poroso (espessura entre 5 – 10 cm), passe por um filtro formado por agregados (diâmetro de 1,25 cm e espessura de 2,5 cm) e chegue em um reservatório de pedras mais profundo com agregados (diâmetro entre 3,8 – 7,6 cm). O revestimento poroso funciona como um conduto que conduz o escoamento até o reservatório de pedras. Dessa forma, a profundidade do reservatório de pedra subterrâneo determina a capacidade de armazenamento dos pavimentos porosos. Já os pavimentos de concreto vazado devem ser assentados em cima de uma camada de base granular. Sob esta camada, filtros geotêxtis devem ser utilizados para que a areia fina não migre para a camada granular (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE, 2005). Na Figura 4 são mostradas as seções transversais dos pavimentos permeáveis.

FIGURA 4 – Seções transversais dos pavimentos permeáveis.



Fonte: Urbonas e Stahre (1993) *apud* Prefeitura Municipal de Porto Alegre (2005).

De acordo com Gonçalves e Oliveira (2014), quanto à infiltração, os pavimentos permeáveis podem ser divididos também em 3 classes: a) pavimento com

infiltração total, onde todo o volume coletado infiltra no solo. É recomendado quando o solo do subleito possui permeabilidade elevada ou o nível do lençol freático for baixo; b) pavimento sem infiltração, onde todo o volume é coletado por sistema de drenagem com tubos perfurados e espaçados de 3 a 8 m para a conduzir a água até a rede de drenagem. Recomendado quando o solo do subleito possui permeabilidade baixa ou o nível do lençol freático for alto; e c) pavimento com infiltração parcial, onde as condições do solo ou do lençol freático são intermediárias.

Os pavimentos permeáveis podem ser utilizados como um poço de detenção, desde que uma membrana impermeável seja alocada entre o reservatório e o solo existente. A principal vantagem dos pavimentos permeáveis é a redução do escoamento superficial. Para que esta eficiência seja sempre garantida, é necessário que esta técnica seja utilizada de maneira racional, levando em consideração seus limites físicos e fazendo a manutenção preventiva, a fim de que se evite seu entupimento. Como desvantagem, têm-se: a) impactos no lençol freático, caso a água drenada esteja contaminada; e b) obstrução dos dispositivos, devido à falta de controle, tanto na construção quanto na manutenção (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE, 2005).

Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) realizaram um experimento que simulava chuvas, com duração de 10 minutos e intensidade de 111,9 mm/h, sobre diferentes tipos de superfícies: solo compactado; pavimento impermeável (concreto); pavimentos semipermeáveis (blocos de concreto e paralelepípedos); e pavimento permeável (blocos de concreto vazados e concreto poroso). O objetivo da simulação era analisar a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial, em comparação com diferentes tipos de superfícies. No Quadro 2 são mostrados os resultados obtidos.

QUADRO 2 – Resultados das simulações de chuva em diferentes superfícies.

<b>Superfície</b>	<b>Chuva total (mm)</b>	<b>Escoamento total (mm)</b>	<b>Coefficiente de Escoamento</b>
Solo Compactado	18,66	12,32	0,66
Paralelepípedos	18,33	10,99	0,60
Bloco de concreto	19,33	15,00	0,78
Concreto	18,33	17,45	0,95
Blocos de concreto vazados	18,33	0,5	0,03
Concreto poroso	20,00	0,01	0,005

Fonte: Adaptado de Araújo, Tucci e Goldenfum (2000).

Com base nos resultados obtidos, Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) observaram que nas simulações de chuva nos pavimentos permeáveis o volume de escoamento superficial foi significativamente baixo, onde, do total de precipitação gerada, apenas 2,7% (blocos de concreto vazados) e 0,05% (concreto poroso) se converteram em escoamento superficial. Devido a questões de resistência estrutural e de manutenção, sugere-se o uso destes dispositivos em estacionamentos para veículos leves, tais como shopping centers e grandes supermercados, uma vez que eles são altamente recomendados para o controle de volume escoados.

Outro estudo comparando a eficiência dos pavimentos permeáveis revestidos por diferentes materiais foi realizado por Collins, Hunt e Hathaway (2007). Os quatro pavimentos estudados pelos autores foram concreto poroso (CP), blocos intertravados de concreto permeável (BCP2) com 8,5% de espaços vazios (peças de concreto SF-Kooperation Rima), blocos intertravados de concreto permeável (BCP1) com 12,9% de espaços vazios (peças de concreto ConPave Octabrick) e blocos de concreto vazados preenchidos de areia (BCV). As taxas de redução para cada pavimento em relação ao pavimento asfáltico estão no Quadro 3.

QUADRO 3 – Taxa média de redução de escoamento superficial do pavimento permeável em relação ao pavimento asfáltico.

Pavimento	Taxa média de redução de escoamento superficial (%)
CP	99,40
BCP2	98,66
BCV	93,91
BCP1	92,19

Fonte: Adaptado de Collins, Hunt e Hathaway (2007) *apud* Pinto (2011).

No Quadro 4, é apresentada uma comparação dos pavimentos de revestimento permeável e impermeável segundo diferentes aspectos.

QUADRO 4 – Comparação entre pavimentos com diferentes revestimentos (continua).

CRITÉRIOS	MATERIAL				
	Solo Natural	Blocos Vazados	Asfalto Poroso	Concreto Poroso	Revestimento Impermeável
Tipo de uso	- Praças - Estacion. - Vias de pedestres - Quadras esportivas	- Praças -Estacion. - Vias de pedestres -Calçadas	Todos os usos desde que com estrutura reforçada	Todos os usos desde que com estrutura reforçada	Todos os usos

CRITÉRIOS	MATERIAL				
	Solo Natural	Blocos Vazados	Asfalto Poroso	Concreto Poroso	Revestimento Impermeável
Capacidade de absorção	Varia de acordo com o material	Média	Boa	Boa	Nula
Manutenção	6 meses	6 meses – 1 ano	Varia de acordo com o uso (6 meses – 2 anos)	6 meses – 2 anos	Depende do local
Custo de implantação	Baixo	Alto	Médio	Médio	Médio
Custo de manutenção	Médio	Alto	Médio – Alto	Médio - Alto	Baixo
Resistência	Medíocre	Boa	Média	Média - Boa	Boa
Retenção partículas sólidas	Não aplicável	Muito boa	Muito boa	Muito boa	Muito boa
Retenção de metais pesados	Não aplicável	Muito boa	Baixa	Muito boa	Baixa

Fonte: Adaptado de Marchiori et. al. (2012) *apud* Gonçalves e Oliveira (2014).

## 2.7 Bacia de Retenção

As bacias de retenção são um mecanismo de controle, regularização e armazenamento de águas pluviais, permitindo a devolução, total ou parcial, das águas a jusante com uma vazão que seja compatível com os diâmetros das redes antigas. Além de amortecer as vazões, a capacidade de armazenamento de águas pluviais das bacias de armazenamento possibilitam a solução de duas situações extremas e opostas: as cheias e as secas. Caso a água coletada seja tratada, as bacias de retenção podem ter um campo de aplicação muito amplo e útil (MANO, 2008).

O objetivo principal das bacias de retenção é minimizar os impactos hidrológicos em uma determinada região provenientes da redução da capacidade de armazenamento da bacia hidrográfica, devido à urbanização e, conseqüentemente, impermeabilização. Não ocorre a redução do volume do hidrograma, mas sim uma melhor distribuição temporal (MILOGRANA, 2001).

A incorporação das várias funções das bacias de retenção é muito evidente quando se analisa a sua aplicação pelo mundo ao longo dos anos. Primeiramente, as

obras visavam apenas um controle quantitativo do escoamento. Em seguida, além do controle do escoamento, as bacias de retenção passaram a ser integradas à paisagem urbana, servindo como um espaço de recreação e lazer. A próxima função somada foi a de contribuir para a qualidade do escoamento superficial. Finalmente, os esforços agora se concentram em estudar a viabilidade de se utilizar o volume de água armazenado como possível fonte de abastecimento (WALESH, 1989 *apud*. CAMPANA, BERNARDES e CORTES 2008).

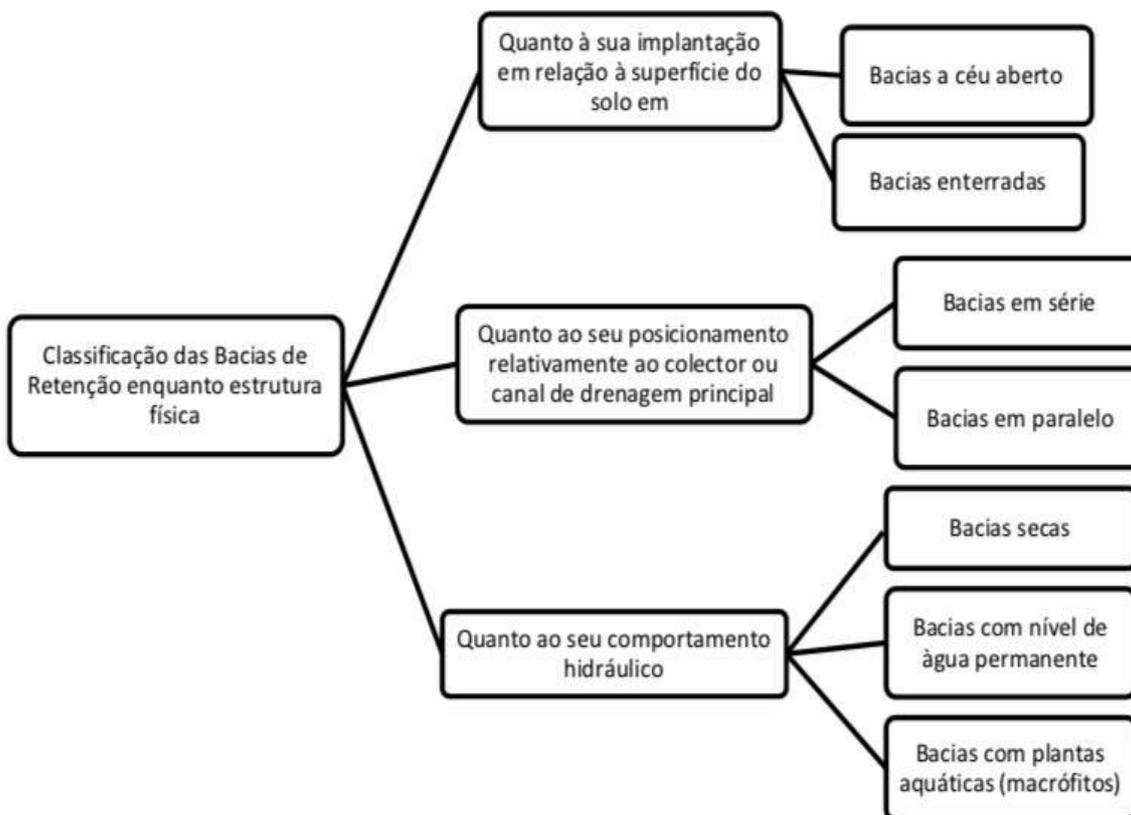
Dentre as muitas funcionalidades das bacias de retenção, Mano (2008) destaca a criação de um espelho d'água com interesse estético, fazendo com que muito arquitetos e urbanistas as utilizem tanto para obras públicas quanto privadas; criação de pontos de interesse recreativo e turístico, permitindo a criação de zonas de lazer proporcionadas tanto pela bacia em si (pesca, canoagem) quanto pelo ambiente que envolve a bacia (piqueniques, passeios, prática de esportes); proteção do meio ambiente, uma vez que a redução da poluição das águas pluviais é possível por meio de processos físicos, químicos e biológicos que podem ser aplicados na bacia, resultando na melhora da qualidade da água; e redução dos riscos de inundação.

Segundo Tucci (2005), uma das práticas mais utilizadas é o dimensionamento de uma área com lâmina d'água para escoar uma cheia frequente e planejamento de área de extravasamento com paisagismo e quadras de esporte, para casos quando as cheias forem acima da cota de risco. Quando esta acontecer, será necessário apenas limpeza da área que foi atingida, sem causar grandes danos a montante ou a jusante.

Devido a sua multifuncionalidade, o uso de bacias de retenção em projetos de drenagem urbana tem como vantagens reduzir o pico do escoamento, o que evita perturbações (tais como inundações); reduzir a carga de contaminante do escoamento; o controle da erosão; melhora da paisagem, criando espaços recreativos e de lazer; e recarga de aquíferos (LIMA, SILVA e RAMINHOS, 2006). Como desvantagem, tem-se a necessidade de um maior volume para o reservatório e controle da qualidade da água (TUCCI, 2005).

Quanto à sua estrutura física, as bacias de contenção podem ser classificadas em diferentes tipos, como pode ser visto pela Figura 5 e detalhado pelo Quadro 5.

FIGURA 5 - Classificação das bacias de retenção quanto a estrutura física.



Fonte: Mano (2008).

QUADRO 5 – Classificação e descrição das bacias de retenção.

Classificação	Descrição
Bacias a céu aberto	Construídas em solos com resistência, características adequadas e com proteção lateral. A sua aplicação está ligada a preocupações de integração paisagística e de valorização de áreas
Bacias enterradas	Situadas abaixo do nível do solo, são bastante semelhantes à reservatórios de água. Por conta da sua localização, o uso de sistemas de bombeamento é indispensável para o esvaziamento da bacia após os períodos de chuvas.
Bacias em série	São aquelas que estão localizadas no alinhamento direto do coletor ou canal de drenagem afluente, interceptando-o. O escoamento afluente passa pela bacia de drenagem. Normalmente, estas bacias possuem um nível de água permanente.
Bacias em paralelo	São aquelas que estão localizadas paralelamente ao coletor ou canal afluente. Nem todo o escoamento de montante chega a bacia, sendo que a passagem é normalmente feita por um descarregador lateral. São bacias de menores dimensão e exigem custos menores de manutenção, uma vez que são menos afetadas pelo acúmulo de sedimentos.
Bacias secas	Construídas para permanecerem a maior parte do tempo sem água, acumulando-a somente em períodos que sucedem chuvas fortes. Além das funções de armazenamento de água

<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
	pluviais, as bacias secas também podem servir como área de jogos, práticas esportivas, áreas de lazer e parques verdes que podem ser utilizados até a altura em que a bacia permanece seca.
Bacias com nível de água permanente	Ao contrário das bacias secas, estas permanecem com água mesmo durante os períodos em que não há chuva. É conveniente que o nível freático esteja situado em uma cota superior à cota do fundo da bacia, garantindo uma alimentação permanente. Caso necessário, pode-se fazer uso de uma bacia de fundo impermeável, de tipo natural ou artificial. É necessário um estudo do balanço entre as afluências (escoamento pluvial, alimentação do lençol freático) e efluências do escoamento (evaporação, infiltração etc.) para garantir um nível de água satisfatório tanto em nível quantitativo quanto qualitativo.
Bacias com plantas aquáticas	O uso de macrófitas em bacias de retenção permite o tratamento das águas pluviais de uma maneira natural. Além de permitir o tratamento sem a necessidade de produtos químicos, facilita um amortecimento significativo da vazão. As águas pluviais são absorvidas pelas raízes das plantas que também aumentam o tempo de permanência da água na bacia, resultando numa maior evapotranspiração. A manutenção é feita por meio de limpeza e atenção ao desenvolvimento das macrófitas. Requerem um volume maior do que as outras bacias.

Fonte: Adaptado de Mano (2008).

Um estudo desenvolvido por Campana, Bernardes e Cortes (2008) mostrou que uma bacia de retenção com nível de água permanente que recebe o escoamento de uma área de drenagem de 6,12 km<sup>2</sup> consegue reduzir em até 78% a vazão de pico. Qualitativamente, a bacia de retenção também se mostrou eficiente na remoção de poluentes. O Quadro 6 contém os resultados obtidos.

QUADRO 6 – Porcentagem de redução da concentração de poluentes para a bacia de detenção monitorada.

<b>Parâmetro</b>	<b>Porcentagem de redução na concentração (%)</b>
DQO	7 – 10
DBO	5 – 9
Sólidos Suspensos	41 – 74
Nitrato	7 – 14
Coliformes Totais	10 – 24
Óleos e Graxas	14 – 21

Fonte: Campana, Bernardes e Cortes (2008).

A localização das bacias de retenção em áreas muito urbanizadas depende tanto da disponibilidade de espaço quanto da capacidade de interferir no amortecimento. Caso só haja espaço disponível a montante e este drena pouco

volume, os efeitos da bacia serão reduzidos (TUCCI, 2005). Outras dificuldades que podem ser enfrentadas para a construção de bacias de retenção em meio a zonas urbanas, são: custo do terreno e especulação imobiliária; necessidade de manutenções mais frequentes na cidade; tipos de vegetação; e dispositivos de vedação e segurança (MANO, 2008).

## **2.8 Tecnologias de Geoprocessamento**

O geoprocessamento pode ser definido como um conjunto de técnicas de armazenamento, processamento, automação e uso de imagens para auxiliar num processo de tomada de decisão. Diz-se que um dado está georreferenciado quando apresenta coordenadas geográficas. O avanço da tecnologia ao longo dos anos permitiu o armazenamento e análise de uma vasta quantidade de informações sobre um dado espaço geográfico, relacionando-as com mapas digitais e associando-as com análises de um mesmo espaço, tais como vegetação, ocupação habitacional, urbanização, hidrografia, entre outros (FRANCELINO, 2003).

As informações, obtidas por satélites e armazenadas em computadores, são utilizadas em softwares específicos que possibilitam aplicações dirigidas para a elaboração e visualização de mapas. A diferença principal entre o geoprocessamento e o Sistema de Informações Geográficas (SIG) é que o primeiro refere-se ao processamento dos dados geograficamente referenciados, a partir do momento em que são coletados até resultarem em mapas ou demais arquivos. Já o SIG é um sistema computacional que possibilita a incorporação e a interação de dados previamente referenciados, visando à produção de análises espaciais que servirão de auxílio nas tomadas de decisões técnicas ou políticas (FRANCELINO, 2003).

Nos últimos anos, o SIG vem sendo muito aplicado em análises e projetos de engenharia, principalmente nas áreas de qualidade de água, hidrologia e hidráulica. Dessa forma, o SIG atua como uma ferramenta de planejamento, facilitando o uso de dados hidráulicos em estudos do seguro de inundação, sistemas de alerta e análises de impactos (ENOMOTO, 2004).

## 2.9 Hidrologia

### 2.9.1 Hidrograma

O hidrograma é um gráfico que relaciona a distribuição da vazão no tempo, resultado de uma interação de todos os elementos que compõem o ciclo hidrológico entre a ocorrência da precipitação e a vazão na bacia hidrográfica. Normalmente, após o início da chuva, existe um intervalo de tempo até que o nível da vazão começa a aumentar devido às perdas por interceptação vegetal e depressões do solo, além de um retardo na própria bacia por conta do tempo de deslocamento da água (TUCCI, 1993).

Dentre os aspectos que influenciam o comportamento do hidrograma, destacam-se: a) a forma da bacia. Uma bacia radial concentra o escoamento e aumenta o pico, enquanto uma bacia alongada, que tem um percurso mais longo até a seção principal, amortece as vazões; b) a cobertura da bacia. Bacias com coberturas vegetais tendem a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração, enquanto bacias urbanas possuem escoamento superficial e picos elevados; c) modificações artificiais no rio, tais como reservatórios de regularização de vazão, que tendem a reduzir o pico e distribuir o volume, e canalizações, que aumentam o pico; d) distribuição, duração e intensidade da precipitação; e e) o solo. Quando o estado de umidade da cobertura vegetal, depressões, camada superior do solo e aquífero for baixo, parte da precipitação é retida (TUCCI, 1993).

Alguns valores de tempo são utilizados visando à caracterização do hidrograma, tais como: a) tempo de retardo, que é o intervalo de tempo entre o centro de massa da precipitação e o centro de gravidade do hidrograma; b) tempo do pico, que corresponde ao intervalo entre o centro de massa de precipitação e o tempo de vazão máxima; c) tempo de concentração, que é definido como o tempo necessário para que a água precipitada no ponto mais distante na bacia desloque-se até a seção principal; d) tempo de ascensão, que é o tempo entre o início da chuva e o pico do hidrograma; e) tempo de recessão, que corresponde ao tempo necessário para que a vazão baixe até o ponto quando acaba o escoamento superficial; e, por fim, f) tempo de base, que é o tempo entre o início da precipitação até que o rio volte às condições anteriores da ocorrência desta (TUCCI, 1993).

### 2.9.2 Método Racional

O Método Racional é um modelo de cálculo de vazão máxima de uma enchente de projeto através de uma expressão, onde se relaciona o valor da vazão, área da bacia e intensidade da chuva. Devido a sua simplicidade, é necessário definir um parâmetro, chamado de coeficiente de escoamento, que expresse a influência da área na formação do deflúvio. Este coeficiente representa a relação chuva-vazão que lhe deu origem, considerando o volume da precipitação vertida, o efeito da variação da intensidade da chuva e as perdas por retenção e infiltração do solo (DNIT, 2005).

Dentre todos os métodos de avaliação de vazão de projeto para os sistemas de drenagem, o Método Racional é o mais utilizado no mundo para bacias de pequeno porte ou em áreas urbanas. Apesar de ser recomendado preferencialmente para bacias com áreas pequenas, nada impede que o método seja aplicado a bacias maiores, como é feito em outros países. Neste método, considera-se que a precipitação sobre a área ocorre de maneira constante e distribuída uniformemente sobre a superfície da bacia. Admite-se também que a duração da chuva é igual ou maior que o seu tempo de concentração, a fim de considerar que todos os pontos da bacia contribuem para a formação do escoamento (DNIT, 2005). Uma vez que a intensidade da chuva diminui com o aumento da duração, a vazão é resultado de uma precipitação com duração igual ao tempo de concentração da bacia.

Assim, o valor da vazão pode ser calculado por:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: Q = Vazão máxima (m<sup>3</sup>/s);

i = Intensidade da chuva (mm/h);

A = Área (km<sup>2</sup>);

C = Coeficiente de escoamento.

Na maioria dos canais e galerias constituintes de sistemas de drenagem urbana não existe escoamento subterrâneo, uma vez que estes sistemas são alimentados pelas bocas de lobo e condutores pluviais. Assim, pode-se considerar o fluxo essencialmente superficial. Tal condição pode ser reforçada devido à alta taxa de impermeabilização das áreas urbanas e pelos sistemas de coleta de águas pluviais,

diminuindo a alimentação do lençol freático e, conseqüentemente, aumentando o coeficiente de escoamento superficial (FRANCO, 2004).

De acordo com Franco (2004), tanto a taxa de impermeabilização quanto o escoamento em galerias de águas pluviais são responsáveis pela diminuição do tempo de concentração nas bacias urbanas. Assim, o método racional é um modelo que satisfaz a maioria das bacias urbanas e seu uso prevalece mesmo em bacias com áreas ligeiramente maiores do que 5 km<sup>2</sup>, ajustando, caso necessário, os fatores intervenientes.

A escolha do Coeficiente de escoamento pode ser feita com base no Quadro 7.

QUADRO 7 – Coeficiente de escoamento superficial.

Descrição da Área/Superfície	Coeficiente C
<u>Comércio</u>	
No centro da cidade	0,70 – 0,95
Nos arredores	0,50 – 0,70
<u>Residencial</u>	
Habitações unifamiliares	0,30 – 0,50
Prédios isolados	0,40 – 0,60
Prédios geminados	0,60 – 0,75
Suburbano	0,25 – 0,40
Área de apartamentos	0,50 – 0,70
<u>Industrial</u>	
Pouco denso	0,50 – 0,80
Muito denso	0,60 – 0,90
Parques e cemitérios	0,10 – 0,25
Campos de jogos	0,20 – 0,35
Pátio e espaço de serviços de estrada de ferro	0,20 – 0,40
Terrenos baldios	0,10 – 0,30
<u>Ruas</u>	
Asfalto	0,70 – 0,95
Concreto	0,80 – 0,95
Tijolos	0,70 – 0,85
Trajetos de acesso a calçadas	0,75 – 0,85
Telhados	0,75 – 0,95
<u>Gramados (Solos arenosos)</u>	
Plano 2%	0,05 – 0,10
Médio 2 – 7%	0,10 – 0,15
Íngreme 7%	0,15 – 0,20
<u>Gramados (Solo compacto)</u>	
Plano 2%	0,13 – 0,17
Médio 2 – 7%	0,18 – 0,22
Íngreme 7%	0,15 – 0,35

Fonte: Adaptado de DNIT (2005); Model Drainage Manual (1991) *apud* Bichançã (2006).

### 2.9.3 Distribuição Temporal das Chuvas

Uma das melhores maneiras de se obter a intensidade das chuvas máximas em uma dada região é por meio das curvas IDF (Intensidade – Duração – Frequência), obtidas a partir de análises estatísticas de longas séries (ao menos 15 anos) de dados de um pluviógrafo. O processo de desenvolvimento de uma curva IDF é baseado na seleção das maiores chuvas com uma determinada duração em cada ano da série de dados. Com base nesta série, uma distribuição de frequências que melhor represente a distribuição dos valores observados é ajustada. Assim, esse mesmo procedimento é repetido para diferentes durações de chuvas, tais como 5 minutos, 10 minutos, 1 hora, 12 horas, 24 horas, 2 dias, etc. Os resultados são, então, resumidos em forma de gráfico ou de uma equação em função das variáveis intensidade, duração e frequência (COLLISCHONN e TASSI, 2008).

Relacionando intensidades e durações das precipitações, conclui-se que quanto maior for a intensidade de uma chuva, menor será sua duração. Da mesma forma, quanto menor for o risco, maior será a intensidade (TUCCI, 1993).

### 3. METODOLOGIA

A metodologia proposta compreende as seguintes etapas: 1) Escolha e caracterização da área de estudo; 2) Determinação da chuva de projeto para a região estudada; 3) Estimativa da vazão de projeto; 4) Estudo e proposição de medidas de controle estruturais para minimizar os problemas de inundação na região em estudo.

#### 3.1 Escolha e Caracterização da Área de Estudo

A escolha da região de estudo baseou-se nos últimos eventos chuvosos que resultaram em inundações e, conseqüentemente, em prejuízos que ocorreram na cidade de Belo Horizonte em fevereiro de 2018. Dessa forma, optou-se por aplicar este estudo na região Nordeste da cidade de Belo Horizonte.

Com uma área de 40,12 km<sup>2</sup>, a região Nordeste possui altitudes que variam de 675 m a 931 m. Conforme mencionado anteriormente, áreas de maior altitude possuem menor probabilidade de inundação devido à ação da gravidade. Por outro lado, as áreas de menor altitude possuem maior probabilidade de inundação. De acordo com Vasconcelos (2016), quando se analisa somente a altitude, 13,83 km<sup>2</sup> (34,5%) da região estudada possui alta probabilidade de inundação.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (*apud* VASCONCELOS, 2016) classifica o relevo brasileiro em 6 diferentes categorias, das quais 5 podem ser identificadas na região Nordeste de Belo Horizonte, como é apresentado no Quadro 8.

QUADRO 8 – Valores de área de acordo com a classificação da declividade (IBGE) na Região Nordeste de Belo Horizonte.

<b>Classificação</b>	<b>Declividade (IBGE)</b>	<b>Área Correspondente na Região Nordeste de BH</b>
Plano	0% – 3%	1,63 km <sup>2</sup>
Suave Ondulado	3% – 8%	7,28 km <sup>2</sup>
Ondulado	8% – 20%	20,85 km <sup>2</sup>
Forte Ondulado	20% – 45%	9,95 km <sup>2</sup>
Montanhoso	45% – 75%	0,10 km <sup>2</sup>
Escarpado	> 75%	-

Fonte: Adaptado de Vasconcelos (2016).

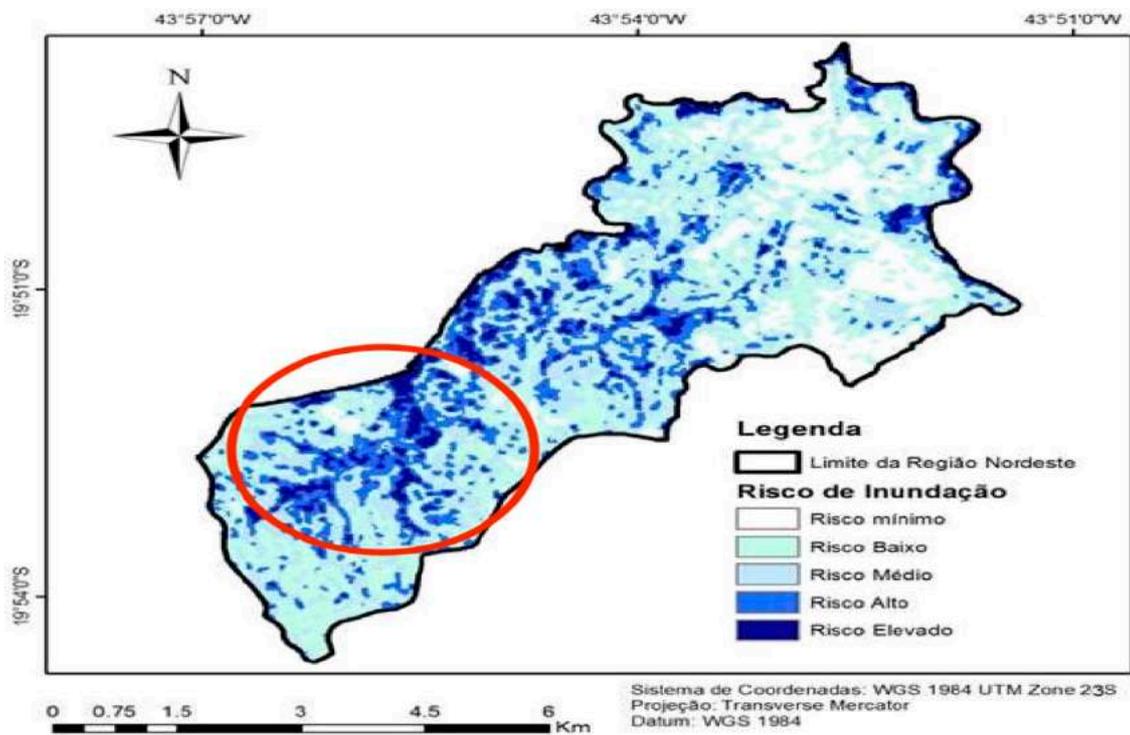
Apesar das áreas planas (declividade entre 0% e 3%) serem menores, a probabilidade de ocorrência de inundações nessas regiões é ainda maior, uma vez que em casos de chuvas mais intensas, parte significativa do escoamento superficial das áreas de maior declividade e, conseqüentemente, menor probabilidade de ocorrência de inundação, se acumulará nas áreas de menor declividade e, conseqüentemente, maior probabilidade de ocorrência de inundação.

Quanto ao uso do solo na região Nordeste, Vasconcelos (2016) concluiu que da área total de 40,12 km<sup>2</sup>, 29,10 km<sup>2</sup> (72,53%) correspondem a áreas urbanizadas e 11,01 km<sup>2</sup> (27,74%) correspondem a áreas com cobertura vegetal. A probabilidade de ocorrência de inundação em regiões urbanizadas é muito maior quando comparada com regiões com cobertura vegetal, uma vez que, com o solo mais impermeável, a água tem mais resistência para infiltrar no solo, aumentando o escoamento superficial.

Quando se analisa o mapa de inundação da região Nordeste de Belo Horizonte elaborado por Vasconcelos (2016), percebe-se que uma das regiões mais problemáticas está localizada a sudoeste do mapa, como pode ser observado pela Figura 6.

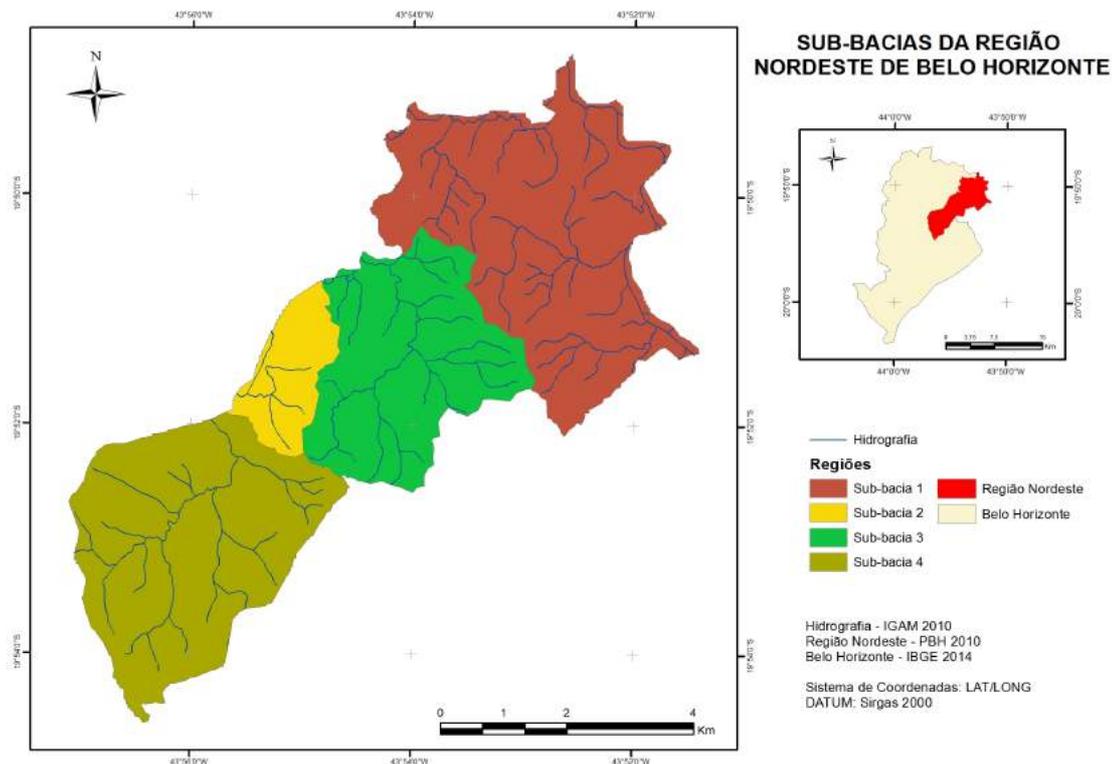
A fim de delimitar as sub-bacias da região Nordeste de Belo Horizonte, utilizou-se uma imagem *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) da região obtida no site do *United States Geological Survey* (USGS) que foi posteriormente trabalhada no software ArcMap 10.2. Utilizando a função *Basin*, as sub-bacias foram delimitadas conforme a direção do fluxo. Como resultado, obteve-se o mapa da Figura 7.

FIGURA 6 – Suscetibilidade à inundação da região Nordeste de Belo Horizonte/MG.



Fonte: Adaptado de Vasconcelos (2016).

FIGURA 7 – Sub-bacias da região Nordeste de Belo Horizonte.



Fonte: Autoria própria (2018).

Dentre as sub-bacias geradas, aquela que apresenta boa parte dos riscos altos e elevados de inundação (Figura 7) é a então definida como Sub-bacia 4. Com o auxílio do ArcMap 10.2 foi possível identificar que essa sub-bacia possui uma área total de 12,61 km<sup>2</sup> (31,43% da região Nordeste), o rio principal possui um comprimento de 5,35 km, altitudes variando de 760 m a 880 m e declividades predominantes entre 8% - 20%, porém declividades mais elevadas também estão presentes.

O córrego Cachoeirinha é o principal córrego dessa sub-bacia e corre próximo a avenidas importantes da capital mineira (Avenida Cristiano Machado e Avenida Bernardo Vasconcelos), que possuem um alto índice de tráfego de carros e pessoas. Dessa forma, inundações no córrego Cachoeirinha podem gerar grandes prejuízos, tais como o arraste de carros, queda de árvores e falta de energia, o que foi observado em eventos ocorridos na cidade em fevereiro de 2018 (Figura 8).

FIGURA 8 – Inundações ocorridas em fevereiro de 2018 na sub-bacia 4.

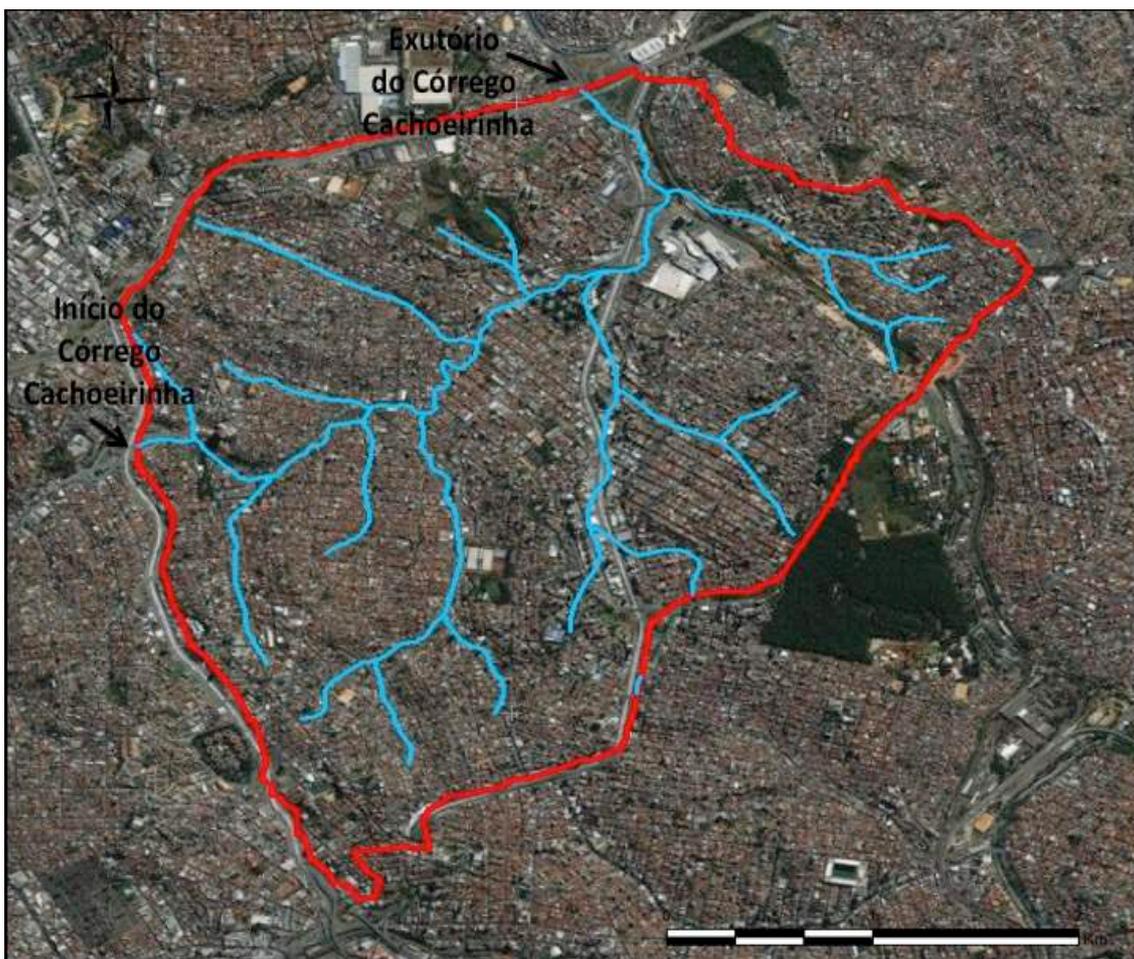


Fonte: BH Trans, Bárbara Donhini e Hoje em Dia (2018).

Um mapa com a imagem de satélite da área estudada foi elaborado utilizando a ferramenta *Geoprocessing* dentro software ArcMap 10.2. Com ele foi possível identificar que o exutório da Sub-bacia 4 fica localizado no cruzamento da Avenida

Cristiano Machado com o Anel Rodoviário Celso Mello Azevedo. Além disso, analisando a Figura 9, acredita-se que o alto nível de urbanização e, conseqüentemente, impermeabilização da superfície do solo contribuem bastante para o agravamento dos eventos de inundação, uma vez que estas aumentam as vazões máximas por conta do aumento da capacidade de escoamento por meio de condutos e canais (TUCCI, 1997).

FIGURA 9 – Imagem de satélite da sub-bacia 4 na região Nordeste de Belo Horizonte.



Fonte: Autoria própria (2018).

### 3.2 Modelo Chuva-Vazão

Para a determinação da relação chuva-vazão, utilizou-se o Método Racional, onde a intensidade da chuva de projeto foi determinada por meio da curva de relações IDF. Em 1998, Pinheiro e Naghettini propuseram a equação IDF para a Região Metropolitana de Belo Horizonte – MG, como:

$$i_{T,t,j} = 0,76542 t^{-0,7059} \cdot P_{\text{anual}}^{0,5360} \cdot \mu_{T,t} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:  $i_{T,t,j}$  = Intensidade da chuva (mm/h ou mm/min);

$t$  = Duração da chuva (h ou min);

$j$  = Local da chuva;

$T$  = Período de retorno (anos);

$P_{\text{anual}}$  = Precipitação anual (mm);

$\mu_{T,t}$  = Quantis adimensionais de frequência.

Os quantis adimensionais de frequência para diversas durações de precipitação e tempos de retorno podem ser obtidos através do Quadro 9.

QUADRO 9 – Quantis adimensionais de frequência.

Duração (h)	Tempo de Retorno (Anos)						
	1,05	1,25	2	10	20	50	100
<b>0,167</b>	0,691	0,828	1,013	1,428	1,586	1,791	1,945
<b>0,25</b>	0,695	0,83	1,013	1,422	1,578	1,78	1,932
<b>0,5</b>	0,707	0,836	1,013	1,406	1,557	1,751	1,897
<b>0,75</b>	0,69	0,827	1,013	1,43	1,589	1,795	1,949
<b>1</b>	0,679	0,821	1,014	1,445	1,61	1,823	1,983
<b>2</b>	0,683	0,823	1,014	1,439	1,602	1,813	1,97
<b>3</b>	0,679	0,821	1,014	1,445	1,61	1,823	1,983
<b>4</b>	0,688	0,826	1,013	1,432	1,591	1,798	1,953
<b>8</b>	0,674	0,818	1,014	1,451	1,618	1,834	1,996
<b>14</b>	0,636	0,797	1,016	1,503	1,69	1,931	2,112
<b>24</b>	0,603	0,779	1,017	1,55	1,754	2,017	2,215

Fonte: Adaptada de Pinheiro e Naghettini (1998).

Para obter a equação que relaciona Precipitação-Duração-Frequência (PDF) para a região de Belo Horizonte fez-se uso da seguinte equação:

$$P = i \cdot t \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:  $P$  = Precipitação (mm);

$i$  = Intensidade da chuva (mm/h);

$t$  = Duração da chuva (h).

Um dos muitos métodos para se estimar o tempo de concentração é por meio da equação de Kirpich (TUCCI, 1993). Para bacias que possuem áreas de drenagem maiores que 100 ha, o tempo de concentração pode ser calculado através da equação de Kirpich Modificada (DIAS e ANTUNES, 2010), conforme a seguinte fórmula:

$$t_c = 85,2 \cdot \left( \frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:  $t_c$  = Tempo de concentração (min);

$L$  = Comprimento do curso d'água (km);

$\Delta h$  = Diferença de altitude ao longo do curso d'água (m).

Como mencionado anteriormente, o método racional é um modelo aplicável à maioria das bacias urbanas e pode ser usado mesmo em bacias com áreas superiores a 5 km<sup>2</sup>. Assim, utilizou-se este método para calcular a vazão total da sub-bacia.

### 3.3 Medidas de Controle

O encontro das avenidas Bernardo Vasconcelos e Cristiano Machado é um dos pontos mais críticos em eventos de inundação na região em estudo. Assim, propôs-se uma medida de controle que minimize os impactos das inundações em cada uma das avenidas. As medidas de controle propostas foram: 1) Uso de pavimentos permeáveis nos estacionamentos do Minas Shopping e Supermercado Extra; 2) Bacia de retenção localizada no Parque Ecológico Renato Azeredo.

#### 3.3.1 Pavimentos Permeáveis

O procedimento adotado para o dimensionamento do pavimento permeável no estacionamento do Minas Shopping é o mesmo adotado por Ciria (1996 *apud* Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2005). O primeiro passo é corrigir o coeficiente de infiltração adotado pelo fator de segurança. Isso pode ser feito por meio da Equação 5.

$$q_{\text{corrigido}} = \frac{q}{FS} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:  $q_{\text{corrigido}}$  = Coeficiente de infiltração corrigido (m/h);

$q$  = Coeficiente de infiltração (m/h);

FS = Fator de segurança.

A razão de drenagem  $R$  que relaciona a área total a ser drenada e a área passível de aproveitamento para aplicação dos pavimentos permeáveis é calculada conforme a Equação 6.

$$R = \frac{A}{A_b} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:  $R$  = Razão de drenagem (adimensional);

$A$  = Área total a ser drenada (m<sup>2</sup>);

$A_b$  = Área passível de aproveitamento (m<sup>2</sup>).

Em seguida, calcula-se a profundidade máxima do pavimento permeável para diferentes durações de chuva através da Equação 7.

$$h_{max} = \frac{t}{\phi} \cdot (R \cdot i - q) \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:  $h_{max}$  = Profundidade máxima (mm);

$t$  = Duração da chuva (h);

$\phi$  = Porosidade efetiva (%);

$R$  = Razão de drenagem (adimensional);

$i$  = Intensidade da chuva (mm/h);

$q$  = Coeficiente de infiltração (m/h);

Ainda seguindo as instruções do Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre (2005), o tempo de esvaziamento do sistema pode ser calculado pela Equação 8.

$$t_{esv} = \frac{\phi \cdot h_{max}}{q} \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:  $t_{esv}$  = Tempo de esvaziamento (h);

$\phi$  = Porosidade efetiva (%);

$h_{max}$  = Profundidade máxima (mm);

$q$  = Coeficiente de infiltração (m/h).

Por fim, Araújo et al. (2000) afirmam que o reservatório de pedras deve ter um tamanho suficiente capaz de acomodar o volume do escoamento da chuva de projeto menos o volume de escoamento que é infiltrado durante a precipitação. Assim, o volume de chuva a ser retido pelo reservatório pode ser definido por meio da Equação 9. O valor encontrado corresponde, em milímetros, a altura da lâmina d'água gerada pela chuva que caiu numa área de 1m<sup>2</sup>.

$$V_r = h_{max} \cdot \phi \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:  $V_r$  = Volume de chuva a ser retido pelo reservatório (mm);

$h_{max}$  = Profundidade máxima (mm);

$\phi$  = Porosidade efetiva (%).

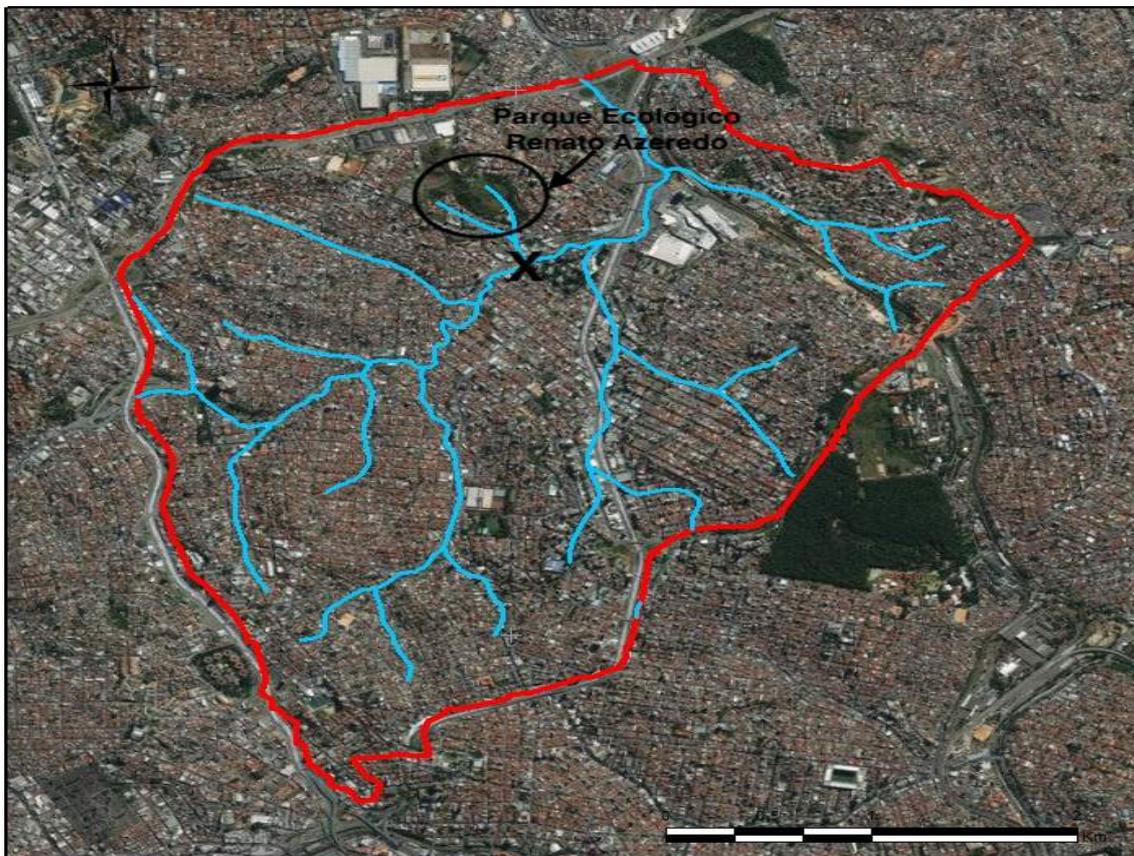
### 3.3.2 Bacia de Retenção

A medida de controle proposta para minimizar os impactos das inundações em eventos de chuvas fortes na avenida Bernardo Vasconcelos foi a construção de uma bacia de retenção. Para tanto, escolheu-se trabalhar com a contribuição da sub-bacia até o ponto destacado por um X na Figura 10. A bacia seria instalada no Parque Ecológico Renato Azeredo, circulado na figura em questão.

O tempo de concentração foi calculado por meio da equação de Kirpich (Equação 4). Antes de calcular o volume da bacia de retenção, Lima, Silva e Raminhos (2006) alertam que se deve calcular as vazões de pré ( $Q_o$ ) e pós-desenvolvimento ( $Q_i$ ), utilizando a Equação 1 referente ao Método Racional. A vazão de pré-desenvolvimento refere-se às condições mais próximas da situação natural, ou seja, um novo empreendimento não poderá produzir uma vazão superior do que aquela que já é produzida pela área ocupada, mantendo a mesma vazão após o processo de desenvolvimento (SUDERHSA, 2002).

Lima, Silva e Raminhos (2006) recomendam três diferentes métodos para se calcular o volume da bacia de retenção: método do hidrograma triangular simplificado, método de regressão de Pagan e método de regressão de Wycoff e Singh. Entretanto, eles também alertam que o método de Pagan geralmente superestima o volume da bacia de retenção, enquanto o método do hidrograma triangular e o proposto por Wycoff e Singh apresentam resultados similares.

FIGURA 10 – Localização do Parque Ecológico Renato Azeredo e ponto de contribuição da sub-bacia para a bacia de retenção.



Fonte: Autoria própria (2018).

Dessa forma, optou-se por utilizar o método do hidrograma triangular simplificado, cujo volume pode ser calculado pela Equação 10.

$$V = \frac{1}{2} \cdot t_b \cdot (Q_i - Q_o) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: V = Volume de armazenamento da bacia de retenção (m<sup>3</sup>);

$t_b$  = Duração da afluência do escoamento na bacia (s);

$Q_o$  = Vazão de pré-desenvolvimento (m<sup>3</sup>/s);

$Q_i$  = Vazão de pós-desenvolvimento (m<sup>3</sup>/s);

DMR (2005 *apud* LIMA, SILVA e RAMINHOS 2006) recomenda que, na ausência de informações precisas quanto à duração da afluência do escoamento na bacia, adote-se:

$$t_b = 2,67 \cdot t_c \quad (\text{Equação 11})$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Modelo Chuva-Vazão

Conforme é sugerido pelo Manual de Instrução Técnica para Elaboração de Projetos de Drenagem Urbana do Município de Belo Horizonte (SUDECAP, 2004), a precipitação média anual adotada para a determinação da intensidade de chuva foi de 1500 mm. Assim, aplicando-se a Equação 2 no software Excel (2011, versão 14.7.2) estimou-se a intensidade da chuva para as durações de 10, 15, 30 e 45 minutos; 1, 2, 3, 4, 8, 14 e 24 horas; e períodos de retorno de 1,05, 1,25, 2, 10, 20, 50 e 100 anos, conforme apresentadas no Quadro 10.

QUADRO 10 – Valores de intensidade da chuva.

<b>i (mm/h)</b>							
<b>Duração (h)</b>	<b>Tempo de Retorno (Anos)</b>						
	<b>1,05</b>	<b>1,25</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>0,167</b>	94	113	138	195	216	244	265
<b>0,25</b>	71	85	104	146	162	183	198
<b>0,5</b>	44	53	64	88	98	110	119
<b>0,75</b>	33	39	48	68	75	85	92
<b>1</b>	26	32	39	56	62	70	76
<b>2</b>	16	19	24	34	38	43	47
<b>3</b>	12	15	18	26	29	32	35
<b>4</b>	10	12	15	21	23	26	28
<b>8</b>	6	7	9	13	14	16	18
<b>14</b>	4	5	6	9	10	12	13
<b>24</b>	2	3	4	6	7	8	9

Fonte: Autoria própria.

Para obtenção da precipitação gerada na região de Belo Horizonte (Quadro 11), ainda utilizando o software Excel, fez-se uso da Equação 3.

QUADRO 11 – Valores de precipitação.

<b>P (mm)</b>							
<b>Duração (h)</b>	<b>Tempo de Retorno (Anos)</b>						
	<b>1,05</b>	<b>1,25</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>0,167</b>	16	19	23	33	36	41	44
<b>0,25</b>	18	21	26	36	40	46	50
<b>0,5</b>	22	26	32	44	49	55	60
<b>0,75</b>	24	29	36	51	56	64	69
<b>1</b>	26	32	39	56	62	70	76
<b>2</b>	32	39	48	68	76	86	93
<b>3</b>	36	44	54	77	86	97	106
<b>4</b>	40	48	59	83	92	104	113
<b>8</b>	48	58	72	103	115	130	142
<b>14</b>	53	67	85	126	142	162	177
<b>24</b>	59	77	100	152	172	198	218

Fonte: Autoria própria.

Com o auxílio do software ArcMap 10.2, foi possível obter as informações que são essenciais para aplicação da Equação 4 na sub-bacia 4. Tais informações e o resultado da Equação de Kirpich estão no Quadro 12.

QUADRO 12 – Tempo de concentração da sub-bacia 4.

<b>Sub-bacia</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Comprimento (km)</b>	<b><math>\Delta h</math> (m)</b>		<b>Tempo de Concentração (min)</b>
4	12,61	5,35	880	120	94
			760		

Fonte: Autoria própria.

Levando em consideração que a duração da chuva deve ser igual ou maior que o seu tempo de concentração, fez-se uso de interpolação para definir os valores de  $i$  e  $P$  para o tempo de 94 minutos (1,57 h). Os resultados obtidos para intensidade e precipitação estão destacados em vermelho, respectivamente, nos Quadros 13 e 14.

QUADRO 13 – Valores de intensidade da chuva para  $t_c = 94$  min (continua).

<b>i (mm/h)</b>							
<b>Duração (h)</b>	<b>Tempo de Retorno (Anos)</b>						
	<b>1,05</b>	<b>1,25</b>	<b>2</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>0,167</b>	94	113	138	195	216	244	265
<b>0,25</b>	71	85	104	146	162	183	198
<b>0,5</b>	44	53	64	88	98	110	119

i (mm/h)							
Duração (h)	Tempo de Retorno (Anos)						
	1,05	1,25	2	10	20	50	100
0,75	33	39	48	68	75	85	92
1	26	32	39	56	62	70	76
1,57	20	25	30	43	48	55	59
2	16	19	24	34	38	43	47
3	12	15	18	26	29	32	35
4	10	12	15	21	23	26	28
8	6	7	9	13	14	16	18
14	4	5	6	9	10	12	13
24	2	3	4	6	7	8	9

Fonte: Autoria própria.

QUADRO 14 – Valores de precipitação para  $t_c = 94$  min.

P (mm)							
Duração (h)	Tempo de Retorno (Anos)						
	1,05	1,25	2	10	20	50	100
0,167	16	19	23	33	36	41	44
0,25	18	21	26	36	40	46	50
0,5	22	26	32	44	49	55	60
0,75	24	29	36	51	56	64	69
1	26	32	39	56	62	70	76
1,57	32	39	48	68	76	86	93
2	32	39	48	68	76	86	93
3	36	44	54	77	86	97	106
4	40	48	59	83	92	104	113
8	48	58	72	103	115	130	142
14	53	67	85	126	142	162	177
24	59	77	100	152	172	198	218

Fonte: Autoria própria.

O Manual de Instrução Técnica para Elaboração de Projetos de Drenagem Urbana do Município de Belo Horizonte (SUDECAP, 2004) recomenda a adoção de coeficientes de escoamento entre 0,7 e 0,9 para áreas urbanas da capital. Assim, resolveu-se adotar o valor médio dos dois extremos:  $C = 0,8$ . O período de retorno adotado foi de 50 anos. Em seguida, fazendo uso da Equação 1, calculou-se a vazão total da bacia.

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6}$$

$$Q = \frac{0,80 \cdot 55 \cdot 12,61}{3,6}$$

$$Q = 154,12 \text{ m}^3/\text{s}$$

#### 4.2 Pavimentos Permeáveis

Como apontado por Vasconcelos (2016), regiões com maiores altimetrias possuem menor probabilidade de que ocorram eventos de inundação devido à gravidade, enquanto regiões com altitudes menores estão mais suscetíveis a esses eventos. A Figura 11, obtida com o auxílio do ArcMap 10.2, mostra que a região dos estacionamentos do Minas Shopping e do Supermercado Extra, próximos à Cristiano Machado, está situada em uma área com menor altitude. Dessa forma, o escoamento superficial gerado nas regiões circunvizinhas é direcionado, primeiramente, para os estacionamentos e, posteriormente, para a avenida.

Além disso, como pode ser visto pela Figura 12, a região em questão sofre com os efeitos das inundações que são constantemente geradas devido à ocorrência de chuvas fortes. Dessa forma, faz-se necessário a adoção de medidas de controle visando a minimização dos efeitos das inundações na região.

FIGURA 11 – Curvas de nível na região nos estacionamentos do Minas Shopping e Supermercado Extra.



Fonte: Autoria própria (2018).

FIGURA 12 – Inundação em frente ao Minas Shopping em fevereiro de 2018.



Fonte: TV Globo (2018).

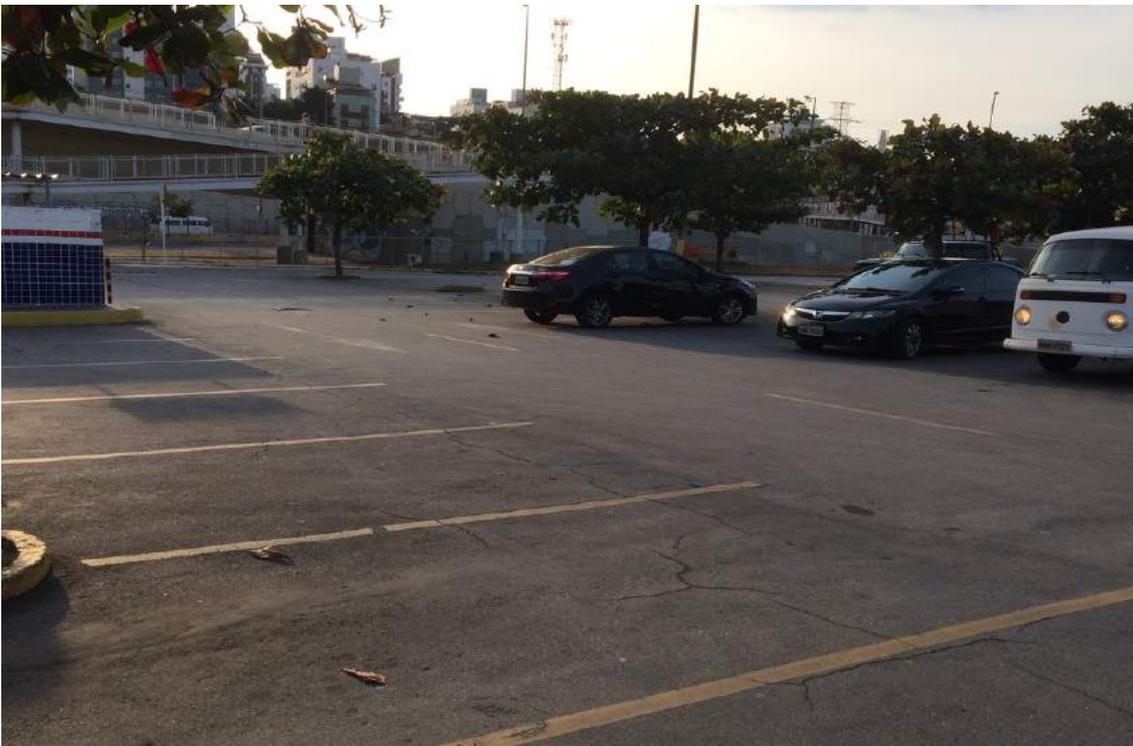
Dentre os materiais possíveis de serem utilizados como revestimento nos pavimentos permeáveis, o concreto poroso é o que apresenta melhores resultados, como pode ser observado nos Quadros 2, 3 e 4. Recomendados para todos os tipos de uso, desde que tenha uma estrutura reforçada, esse material apresenta boa capacidade de absorção, de resistência e de retenção de partículas sólidas e de metais pesados. Apesar de poder apresentar um custo de manutenção alto, ela pode vir a ser necessária em prazos de até 2 anos. O concreto poroso apresenta o menor coeficiente de escoamento ( $C = 0,005$ ), o que corresponde a uma baixa quantidade de escoamento gerado, apresentando a melhor eficiência dentre os materiais de revestimento. Dessa forma, optou-se por adotar o concreto poroso como material de revestimento dos pavimentos permeáveis a serem utilizados nos estacionamentos do Minas Shopping e Supermercado Extra. Atualmente, o material de revestimento em ambos os estacionamentos é asfalto normal, como mostram as Figuras 13 e 14.

FIGURA 13 – Estacionamento do Minas Shopping.



Fonte: Autoria própria (2018).

FIGURA 14 – Estacionamento do Supermercado Extra.



Fonte: Autoria própria (2018).

Com base em um estudo detalhado no Plano Municipal de Saneamento de Belo Horizonte (SUDECAP, 2013) feito no Parque Nossa Senhora da Piedade, localizado na região Nordeste da capital, adotou-se um coeficiente de infiltração ( $q$ ) para pavimento asfáltico de 0,0594 m/h. O primeiro passo foi corrigir o coeficiente de infiltração adotado pelo fator de segurança quando não há nenhum dano ou inconveniência ( $FS = 1,5$ ). Assim:

$$q_{\text{corrigido}} = \frac{q}{FS}$$

$$q_{\text{corrigido}} = \frac{0,0594}{1,5}$$

$$q_{\text{corrigido}} = 0,040 \text{ m/h}$$

A delimitação e o dimensionamento da área de aplicação dos pavimentos permeáveis foram feitos com o auxílio do software Google Earth, como pode ser visto na Figura 15.

FIGURA 15 – Área de aplicação dos pavimentos permeáveis.



Fonte: Autoria própria (2018).

Desconsiderando os pequenos canteiros e demais estruturas que impossibilitariam a aplicação dos pavimentos permeáveis, da área total a ser drenada ( $A = 34.230 \text{ m}^2$ ), seria passível de aproveitamento uma área de aproximadamente  $A_b = 28.230 \text{ m}^2$ . Dessa forma, a razão de drenagem  $R$  pode ser calculada por meio da Equação 6.

$$R = \frac{A}{A_b}$$

$$R = \frac{34.230}{28.230}$$

$$R = 1,21$$

Para estruturas de controle na fonte, como é o caso dos pavimentos permeáveis, recomenda-se o uso de tempos de retorno de 10 anos. A intensidade da chuva ( $i$ ) para a duração ( $t = 1,57$  horas) e para o tempo de retorno ( $T = 10$  anos) adotados já havia sido calculada previamente e pode ser obtida pelo Quadro 13. Assim,  $i = 43 \text{ mm/h}$ .

Schuller (1987) recomenda a utilização de brita 3 ou 4 no reservatório de pedras (*apud* PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE, 2005). Dessa forma, optou-se por utilizar brita 3 (comercial) como material de preenchimento, a qual apresenta uma porosidade efetiva de  $\phi = 0,40$ . Em seguida, utilizando a Equação 7, calculou-se a profundidade máxima do pavimento permeável para diferentes durações de chuva. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 15.

QUADRO 15 – Profundidades dos pavimentos permeáveis para diferentes durações.

Duração (h)	i (mm/h)	h <sub>max</sub>	
		(mm)	(m)
<b>0,167</b>	195	98	0,10
<b>0,25</b>	146	110	0,11
<b>0,5</b>	88	134	0,13
<b>0,75</b>	68	153	0,15
<b>1</b>	56	169	0,17
<b>1,57</b>	43	206	0,21
<b>2</b>	34	206	0,21

Fonte: Autoria própria.

O Manual de Drenagem Urbana da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (2005) recomenda, por questões práticas, o uso de profundidades dos reservatórios de pedras dos pavimentos permeáveis de no mínimo 0,15 m. Analisando o Quadro 13, percebe-se que tal condição é respeitada para o tempo de concentração adotado de 1,57 h. Assim,  $h_{max} = 0,21$  m.

Por meio da Equação 8, calculou-se o tempo de esvaziamento do sistema.

$$t_{esv} = \frac{\phi \cdot h_{max}}{q}$$

$$t_{esv} = \frac{0,40 \cdot 0,21}{0,040}$$

$$t_{esv} = 2,1 \text{ h}$$

De acordo com o Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre (2005), o tempo de esvaziamento do dispositivo deve ser menor que 12 horas. Assim, o valor encontrado de 2,1 horas atende o estabelecido.

Por fim, com base na Equação 9, calculou-se o volume de chuva a ser retido pelo reservatório pré-dimensionado.

$$V_r = h_{max} \cdot \phi$$

$$V_r = 206 \cdot 0,40$$

$$V_r = 82,4 \text{ mm}$$

Dessa forma, sabendo que a área passível de aproveitamento para a implementação dos pavimentos permeáveis é de  $A_b = 28.230 \text{ m}^2$ , o volume total do reservatório do dispositivo pode ser definido por:

$$V = V_r \cdot A_b$$

$$V = 82,4 \cdot \left( \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right) \cdot 28.230$$

$$V = 2.326,15 \text{ m}^3$$

As demais medidas para aplicação dos pavimentos permeáveis nos estacionamentos do Minas Shopping e Supermercado Extra podem ser vistas na Figura 16 e foram obtidas com o auxílio do software Google Earth.

FIGURA 16 – Dimensões do pavimento permeável nos estacionamentos do Minas Shopping e Supermercado Extra.



Fonte: Autoria própria (2018).

### 4.3 Bacia de Retenção

Com uma área de 92.700 m<sup>2</sup>, o Parque Ecológico Renato Azeredo é hoje um espaço de lazer que oferece brinquedos para crianças, aparelhos de ginástica, quadra poliesportiva, pista de caminhada, mirantes e espaços de convivência, como pode ser visto pelas Figuras 17 e 18. Considerando a proximidade do Parque Ecológico Renato Azeredo da Avenida Bernardo Vasconcelos e a sua grande área disponível, optou-se por situar a bacia de retenção dentro do parque.

FIGURA 17 – Espaço de lazer do Parque Ecológico Renato Azeredo.



Fonte: Autoria própria (2018).

FIGURA 18 – Espaço de lazer do Parque Ecológico Renato Azeredo.



Fonte: Autoria própria (2018).

Inicialmente, para o pré-dimensionamento da bacia de retenção, calculou-se o tempo de concentração do novo ponto considerado. Com o auxílio do software ArcMap 10.2, obtiveram-se as informações essenciais para a aplicação da Equação 4. Tanto as informações quanto o tempo de concentração calculado estão apresentados no Quadro 16.

QUADRO 16 – Tempo de concentração até o ponto X.

Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Comprimento (km)	Δh (m)		Tempo de Concentração (min)
Ponto X	6,5	3,31	880	90	60
			790		

Fonte: Autoria própria.

Devido aos atuais altos níveis de urbanização e, conseqüentemente, impermeabilização da área, as condições naturais da região não podem mais serem obtidas. Assim, considerando a situação de pré-desenvolvimento como o cenário atual e a situação de pós-desenvolvimento como o cenário futuro após o período de retorno, adotou-se o coeficiente de escoamento  $C = 0,80$  para a vazão de pré-desenvolvimento ( $Q_o$ ) e  $C = 0,90$  para a vazão de pós-desenvolvimento ( $Q_i$ ). VDOT (2001, *apud* LIMA, SILVA e RAMINHOS, 2006) afirma que a bacia de retenção deve ser dimensionada para um período de retorno de, no mínimo, 10 anos. A intensidade da chuva ( $i$ ) para a duração ( $t = 1,0$  hora) e tempo de retorno ( $T = 10$  anos) adotados já havia sido calculada previamente e pode ser obtida pelo Quadro 13. Assim, aplicando a Equação 1 para  $i = 56$  mm/h, tem-se:

$$Q_o = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6}$$

$$Q_o = \frac{0,80 \cdot 56 \cdot 6,5}{3,6}$$

$$Q_o = 80,9 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_i = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6}$$

$$Q_i = \frac{0,90 \cdot 56 \cdot 6,5}{3,6}$$

$$Q_i = 91,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

Em seguida, como recomendado, adotou-se a relação da Equação 11 para definir a duração da afluência do escoamento na bacia. Assim:

$$t_b = 2,67 \cdot t_c$$

$$t_b = 2,67 \cdot 60 \text{ min} \cdot 60 \text{ s}$$

$$t_b = 9.612 \text{ s}$$

Dessa forma, o volume da bacia de retenção é dado por:

$$V = \frac{1}{2} \cdot t_b \cdot (Q_i - Q_o)$$

$$V = \frac{1}{2} \cdot 9612 \cdot (91 - 80,9)$$

$$V = 48.540 \text{ m}^3$$

De acordo com Carvalho e David (2008), diferentes geometrias podem ser levadas em consideração para a construção das bacias de retenção. Simulações feitas pelos autores consideraram alturas de armazenamento que chegavam até 5 metros. Dessa forma, após a determinação do volume de armazenamento, definiu-se as dimensões da bacia. Sabendo que a razão comprimento/largura da bacia de retenção não deve ser menor que 2/1 (LIMA, SILVA e RAMINHOS, 2006), optou-se por adotar uma profundidade de  $h = 5,0 \text{ m}$ , comprimento de  $L = 140,0 \text{ m}$  e largura  $w = 70,0 \text{ m}$ . O volume total da bacia com essas dimensões é igual a:

$$V = h \cdot L \cdot w$$

$$V = 5 \cdot 140 \cdot 70$$

$$V = 49.000 \text{ m}^3$$

As medidas sugeridas para dimensionar a bacia de retenção atendem ao valor mínimo necessário para armazenar os volumes de chuva gerados ( $V = 48.540 \text{ m}^3$ ). Assim, com o auxílio do software Google Earth, representou-se a localização da bacia de retenção prédimensionada dentro do Parque Ecológico Renato Azeredo (Figura 19).

FIGURA 19 – Localização da bacia de retenção prédimensionada na área de estudo.



Fonte: Autoria própria (2018).

#### 4.4 Redução de Volume de Chuva

A fim de estimar o percentual de redução alcançado com a aplicação das medidas de controle propostas, calculou-se a vazão na sub-bacia 4 para um tempo de retorno de 10 anos, que é o mesmo dos pavimentos permeáveis e da bacia de retenção, e para uma duração de 1,57 h. Assim, aplicando-se a Equação 1, tem-se:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{3,6}$$

$$Q = \frac{0,80 \cdot 43 \cdot 12,61}{3,6}$$

$$Q = 120,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

O volume de chuva precipitado na área pode ser determinado multiplicando-se a vazão obtida pelo tempo de duração da chuva:

$$V_{chuva} = Q \cdot t$$

$$V_{chuva} = 120,5 \cdot 94 \text{ min} \cdot \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right)$$

$$V_{chuva} = 679.620 \text{ m}^3$$

Sabendo que o volume de precipitação retido pelos pavimentos permeáveis, para uma duração de chuva de 1,57 h, é de 2.326,15 m<sup>3</sup> e pela bacia de retenção, para uma duração de 1 h, é de 49.000 m<sup>3</sup>, o volume total retido é de 51.326,15 m<sup>3</sup>. Dessa forma, o volume de chuva que chegará ao exutório da sub-bacia, desconsiderando as demais perdas como infiltração, evaporação e evapotranspiração, é dado por:

$$V = V_{chuva} - V_{retido}$$

$$V = 679.620 - 51.326,15$$

$$V = 628.293,85 \text{ m}^3$$

Tal valor corresponde a uma redução de 7,55% no volume total de chuva precipitada na sub-bacia 4.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As medidas de controle são um conjunto de ações que procuram minimizar os riscos aos quais a população está exposta devido à ocorrência de inundações. Buscando uma urbanização harmoniosa, a eficácia da aplicação das medidas de controle em grandes centros urbanos é inegável, quando bem planejadas.

Os resultados obtidos para o uso da técnica de pavimentos permeáveis nos estacionamentos do Minas Shopping e Supermercado Extra, localizados na avenida Cristiano Machado, estão dentro dos padrões estabelecidos pelo Manual de Drenagem Urbana da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (2005). Adotando a brita 3 (comercial) como material de preenchimento, a profundidade máxima do piso, que deveria ser de no mínimo 0,15 m, foi de 0,21 m; e o tempo de esvaziamento do dispositivo, que deveria ser menor que 12 horas, foi de 2,1 horas.

Com o uso dessa medida de controle, que possui um volume com capacidade de 2.326,15 m<sup>3</sup>, acredita-se que o escoamento superficial que atinge a avenida Cristiano Machado na altura de ambos os estacionamentos irá diminuir. Conseqüentemente, espera-se que as adversidades geradas com as inundações também diminuam na região em questão. Entretanto, recomenda-se averiguar possíveis inviabilidades para a implantação da técnica, tais como valores econômicos, rotatividade e tipos de veículos, visando verificar se a infraestrutura planejada suportaria ou se um reforço seria necessário.

Quanto ao pré-dimensionamento da bacia de retenção no Parque Ecológico Renato Azeredo, localizado em paralelo com a avenida Bernardo Vasconcelos, as dimensões obtidas estão de acordo com o sugerido por Lima, Silva e Raminhos (2006), uma vez que a razão comprimento/largura da bacia foi respeitada, não sendo menor que 2/1. Devido à uma altura um pouco mais elevada, sugere-se para a implementação dessa bacia o uso de medidas de segurança. Conservando o ambiente recreacional no entorno da bacia, como ciclovias, pistas de caminhada, aparelhos de ginástica, entre outros, já existentes no parque, espera-se manter a área de lazer para a população, enriquecendo-a com mais um cenário paisagístico.

Como já comprovado pela vasta literatura, as bacias de retenção possuem um papel importante na redução dos picos de escoamento, o que implica diretamente na redução dos eventos e/ou magnitude das inundações. Assim, pretende-se com o uso

da bacia de retenção projetada, redirecionar o escoamento gerado durante chuvas fortes na região, diminuindo a ocorrência e os impactos de inundações na avenida Bernardo Vasconcelos. Devido à grande quantidade de movimentação de terra que seria necessário para a implementação dessa bacia, talvez ela não seja a opção mais barata e acessível. Além disso, se faz necessário um estudo mais detalhado quanto à viabilidade técnica e econômica da implantação da bacia no parque, bem como uma análise em relação ao plano diretor da região, a fim de verificar a existência de restrições quanto ao uso da área. Entretanto, os impactos positivos que ela poderia trazer pra região, tanto no âmbito ambiental quanto social, são certos.

Com a aplicação de ambas medidas estruturais espera-se uma redução de 7,55% na vazão da sub-bacia para um tempo de retorno de 10 anos. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de simulação do efeito dessa redução na sobre-elevação do nível d'água do córrego Cachoeirinha, a fim de verificar a influência das medidas estruturais na diminuição do transbordamento do córrego.

Ainda que a eficácia das medidas estruturais tenha sido demonstrada, esta pode ser potencializada caso sejam aplicadas em conjunto com medidas não-estruturais. Apesar de serem pouco valorizadas pela população, por terem custos mais baixos e não envolverem obras visíveis, as medidas não-estruturais trabalham com horizontes de tempo mais longos e contribuem diretamente na origem do problema, diminuindo causas, danos ou consequências das inundações através do uso de normas e regulamentos. Assim, recomenda-se que, além da aplicação dos pavimentos permeáveis e da bacia de retenção na região estudada, faça-se uso de medidas não-estruturais, tais como educação ambiental, sistemas de alerta, seguros contra enchentes, distribuição de informação sobre enchentes e inundações, entre outras, visando à obtenção de melhores resultados e um melhor aproveitamento das medidas de controle estruturais sugeridas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. **Avaliação da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução de Escoamento Superficial**. In: RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, n. 3, p. 21 – 29, jul./set. 2000.

BICHANÇA, M. F. **Bacias de Retenção em Zonas Urbanas como Contributo para a Resolução de Situações Extremas: Cheias e Secas**. Porto: p. 142, dez. 2006. Dissertação (Mestrado em Vias de Comunicação na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto). Porto – Portugal. 2006.

CAMPANA, N. A.; BERNARDES, R. S.; CORTES, J. M. Controle do Escoamento Pluvial Urbano Com Bacias de Detenção na Cidade de Brasília/Brasil. In: **Ingeniería del Agua**, v. 15, n. 2, p. 73 – 80, ISSN: 1134–2196, jun. 2008

CAMPOS, L. C. **Proposta de Reanálise do Risco Geológico-Geotécnico de Escorregamentos em Belo Horizonte – Minas Gerais**. 2011. Belo Horizonte: p. 143, Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011. Disponível em: <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8PJP3R/texto\\_disserta\\_\\_o.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8PJP3R/texto_disserta__o.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 15 abr. 2018.

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. São Paulo: Oficina de textos, 2014, p. 478. ISBN 978-85-7975-181-3.

CARVALHO, R. F.; DAVID, L. M. **Bacias de Retenção para Controle de Cheias: Reflexão Sobre Métodos de Dimensionamento**. In: 13º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Universidade Beira Interior, Covilhã – Portugal, 2008. Disponível em: <[http://repositorio.Inec.pt:8080/bitstream/123456789/1002994/1/C\\_T2\\_J\\_LuisMesquitaDavid-13ºENASB.pdf](http://repositorio.Inec.pt:8080/bitstream/123456789/1002994/1/C_T2_J_LuisMesquitaDavid-13ºENASB.pdf)> Acesso em: 10 mai. 2018.

CASTRO, A. L. C. **Manual de Desastres**. Volume I: Desastres Naturais. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. Disponível em: <[http://www.integracao.gov.br/c/document\\_library/get\\_file?uuid=47a84296-d5c0-474d-a6ca-8201e6c253f4&groupId=10157](http://www.integracao.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=47a84296-d5c0-474d-a6ca-8201e6c253f4&groupId=10157)> Acesso em: 8 set. 2017.

CHAMPS, J. R. B. Inundações Urbanas em Belo Horizonte. Ocorrências, Controle e Medidas de Proteção. In: UNESCO. **Aqua-LAC**, v. 4, n. 2, set. 2012, p. 1 – 6. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002270/227014m.pdf>>. Acesso em: 9 set. 2017.

COLLINS, K. A.; HUNT, W. F.; HATHAWAY, J. M. Evaluation of various types of permeable pavement with respect to water quality improvement and flood control. In: **NATIONAL LOW IMPACT DEVELOPMENT CONFERENCE**, 2, 2007, Wilmington,

N.C. Proceedings. North Carolina: American Society of Civil Engineers, 2007.p. 275-289.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. Apostila. IPH-UFRGS, v. 5, p. 151, mai. 2008.

COMISSÃO ECONÔMICA PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE (CEPAL)-HELMHOLTZ ASSOCIATION. **Risk Habitat Megacity: A Helmholtz Research Initiative 2007 – 2013**. Research Plan. Leipzig: UFZ, mar. 2008. Disponível em: <[https://www.ufz.de/export/data/29/39249\\_englisch\\_mc\\_neu4.pdf](https://www.ufz.de/export/data/29/39249_englisch_mc_neu4.pdf)> Acesso em: 7 set. 2017.

DIAS, F. S.; ANTUNES, P. T. S. C.; **Estudo Comparativo de Projeto de Drenagem Convencional e Sustentável para Controle de Escoamento Superficial em Ambientes Urbanos**. Rio de Janeiro: p. 116, 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Rio de Janeiro – RJ. 2010.

DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. Rio de Janeiro: ed. 2, p. 133, 2005.

ENOMOTO, C. F. **Método Para Elaboração de Mapas de Inundação: Estudo de Caso na Bacia do Rio Palmital, Paraná**. Curitiba: Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná – Curitiba, 2004.

FRANCELINO, M. R. **Introdução ao Geoprocessamento**. Caratinga: nov. 2003. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABOCUAK/introducao-geoprocessamento>>. Acesso em: 9 set. 2017.

FRANCO, E. J. **Dimensionamento de Bacias de Detenção das Águas Pluviais com Base no Método Racional**. Curitiba: p. 155, dez. 2004. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná). Curitiba – PR, 2004.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. **Considerações Sobre as Inundações no Brasil**. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, ABRH, 2005. Disponível em: <[http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005\\_inundacoes.pdf](http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf)>. Acesso em: 27 ago. 2017.

GONÇALVES, A. B.; OLIVEIRA, R. H. **Pavimentos Permeáveis e Sua Influência Sobre a Drenagem**. São Paulo: p. 12, 2014. Disponível em: <[www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id\\_arq=11805](http://www.pha.poli.usp.br/LeArq.aspx?id_arq=11805)> Acesso em: 7 mai. 2018.

JATOBÁ, S. U. S. **Urbanização, Meio Ambiente e Vulnerabilidade Social**. In: Boletim Regional, Urbano e Ambiental. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 05

jun. 2011. Disponível:  
<[http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/boletim\\_regional/111125\\_boletimr\\_egional5.pdf](http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/boletim_regional/111125_boletimr_egional5.pdf)>. Acesso em: 7 set. 2017.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M. **Prevenção de Desastres Naturais: Conceitos Básicos**. Florianópolis: Organic Trading, 2006, ed. 1, p. 109. Disponível em: <<http://logatti.edu.br/images/prevencaodesastres.pdf>>. Acesso em: 7 set. 2017.

LIMA, H. M.; SILVA, E. S.; RAMINHOS, C. **Bacias de Retenção para Gestão do Escoamento: Métodos de Dimensionamento e Instalação**. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 59(1): 97-109, jan./mar. 2006.

LUCAS, T. P. B.; AUGUSTO, P.; REIS, S.; ROCHA, S. C. Impactos Hidrométricos em Belo Horizonte. In: **Revista Brasileira de Climatologia**, a. 11, v. 16, jan/jul 2015. ISSN: 1980-055x (Impressa) 2237-8642 (Eletrônica). Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/37051/25982>> Acesso em: 15 abr. 2018.

MANO, E. R. C. **Estudo de Bacias de Retenção como Solução para Situações Crescentes de Urbanização**. Porto: p. 168, fev. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Vias de Comunicação). Porto – Portugal. 2008.

MARTINE, G; MCGRANAHAN, G. A transição urbana brasileira: trajetória, dificuldades e lições aprendidas. In: ENINGER, R. (Org). **População e Cidades: subsídios para o planejamento e para as políticas sociais**. Campinas: Núcleo de Estudos de População -Nepo/Unicamp; Brasília: UNFPA, 2010, p; 11 – 24. Disponível em: <[http://www.unfpa.org.br/Arquivos/populacao\\_cidade.pdf](http://www.unfpa.org.br/Arquivos/populacao_cidade.pdf)>. Acesso em: 7 set. 2017.

MILOGRANA, J. **Estudo de medidas de controle de cheias em ambientes urbanos**. Brasília: MTARH.DM – 035A/2001, p. 112, mai. 2001. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - UNB). Brasília, 2001.

PINHEIRO, M. M. G.; NAGHETTINI, M. **Análise Regional de Frequência e Distribuição Temporal das Precipitações Intensas na Região Metropolitana de Belo Horizonte**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 3, n. 4, p. 73-88, 1998.

PINTO, L. L. C. A. **O Desempenho de Pavimentos Permeáveis Como Medida Mitigadora da Impermeabilização do Solo Urbano**. São Paulo: p. 283, mai. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica). São Paulo, 2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **Plano Diretor de Drenagem Urbana: Manual de Drenagem Urbana**. Porto Alegre: v. VI, p. 223, set. 2005.

SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. **Sensoriamento Remoto Para Desastres**. São Paulo: Oficina de textos, 2015. 293 p. ISBN 978-85-7975-178-3.

SUDECAP (Superintendência de Desenvolvimento da Capital). **Instrução Técnica para Elaboração de Estudos e Projetos de Drenagem Urbana do Município de Belo Horizonte**. Belo Horizonte: PMBH. 2004. 55, p.

SUDECAP (Superintendência de Desenvolvimento da Capital). **Plano Municipal de Saneamento de Belo Horizonte 2012/2015**. Belo Horizonte: v. I/II, jan. 2013. Disponível em: < [https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/2018/documentos/volumei\\_texto\\_2012.pdf](https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/2018/documentos/volumei_texto_2012.pdf)> Acesso em: 4 mai. 2018.

SUDERHSA (Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). **Programa de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Curitiba: Programa Diretor de Drenagem para a Bacia do Rio Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba: CH2M Hill, v. 1, p. 150, dez. 2002.

TUCCI, C. E. M. Água no Meio Urbano. In: **Água Doce**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, dez. 1997, cap. 14, p. 40. Disponível em: <[http://www.pec.poli.br/sistema/material\\_disciplina/fotos/águanomeio%20urbano.pdf](http://www.pec.poli.br/sistema/material_disciplina/fotos/águanomeio%20urbano.pdf)>. Acesso em: 7 set. 2017.

TUCCI, C. E. M. **Águas Urbanas**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v22n63/v22n63a07>>. Acesso em: 27 ago. 2017.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Rio Grande do Sul: Ministério das Cidades, Global WaterPartnership, Wolrd Bank, Unesco 2005, p. 270. Disponível em: <[https://labgeologiaambiental.jatai.ufg.br/up/285/o/Gestão\\_de\\_Aguas\\_Pluviais\\_\\_.PDF?1370615799](https://labgeologiaambiental.jatai.ufg.br/up/285/o/Gestão_de_Aguas_Pluviais__.PDF?1370615799)>. Acesso em: 8 set. 2017.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, v. 4, ed. 2, p. 943, 1993. ISBN 85-7025-298-6.

VASCONCELOS, B. L. V. **Uso de Geoprocessamento para Delimitação de Áreas Susceptíveis a Inundação na Região Nordeste do Município de Belo Horizonte/MG**. 2016. Belo Horizonte: p. 61, Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Minas Gerais, 2016. Disponível em: < [http://www.dcta.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/21/2017/06/TCC\\_BERNARDO-LOPES-VIEIRA-VASCONCELOS.pdf](http://www.dcta.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/21/2017/06/TCC_BERNARDO-LOPES-VIEIRA-VASCONCELOS.pdf)>. Acesso em: 17 nov. 2017.