



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

POLIANA DE ALMEIDA ANDRADE
SARAH CAROLINE CASTRO GONÇALVES

***SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO E OTIMIZAÇÃO
DE GALERIAS DE DRENAGEM URBANA UTILIZANDO
O SWMM***

OURO BRANCO-MG
AGOSTO-2021



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA

POLIANA DE ALMEIDA ANDRADE
SARAH CAROLINE CASTRO GONÇALVES

***SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO E OTIMIZAÇÃO
DE GALERIAS DE DRENAGEM URBANA UTILIZANDO
O SWMM***

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à Coordenação do
Curso de Graduação em Engenharia
Civil, da Universidade Federal de São
João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba,
como requisito parcial para a obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia
Civil

Orientador: Emmanuel
Kennedy da Costa Teixeira

OURO BRANCO-MG
AGOSTO-2021

POLIANA DE ALMEIDA ANDRADE
SARAH CAROLINE CASTRO GONÇALVES

***SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO E
OTIMIZAÇÃO DE GALERIAS DE DRENAGEM
URBANA UTILIZANDO O SWMM***

***Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do
Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de
São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como requisito parcial para
a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.***

Aprovado em ____ / ____ / _____

COMISSÃO EXAMINADORA:

Professor Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira – Orientador UFSJ

Me. Rafael Petruceli Coelho Lima - UFV

Professora Ana Letícia Pilz de Castro - UFOP

RESUMO

Os eventos relacionados ao clima, o aumento na impermeabilização das bacias e a falta de investimentos na área de drenagem urbana são fatores que contribuem para a necessidade, cada vez maior, de se pensar no escoamento das águas das chuvas. No Brasil, a realidade da drenagem urbana ainda é crítica e não há uma normativa que conduza o seu dimensionamento. Tradicionalmente, utiliza-se o Método Racional no dimensionamento das redes de drenagem urbana, para bacias de até 2,5 Km, a partir do cálculo das vazões máximas de projeto. Apesar de ainda ser um método muito utilizado no país, algumas literaturas consideram que essa simplificação não é adequada na hidráulica de canais e sugerem a utilização das equações de Saint-Venant para este cálculo. Para resolvê-las, é necessária a utilização de modelos numéricos e, para este trabalho, foi utilizado *Storm Water Management Model* (SWMM). Com auxílio dessa ferramenta, realizou-se uma simulação de escoamento e otimização das galerias de drenagem urbana de um projeto existente, o qual utilizou do Método Racional em seu dimensionamento original. Através da simulação, percebeu-se uma variação de cerca de 20,12% entre os métodos de cálculo de vazão, o qual o Método Racional apresentou os menores valores. Além disso, percebeu-se que o dimensionamento proposto, considerando um modelo de otimização manual das galerias, através de método iterativo, apresentou custo reduzido comparado ao projeto original. Concluiu-se que, com a resolução das equações de Saint-Venant através do SWMM, os resultados se aproximam mais da realidade do escoamento em galerias. Tem-se também que quanto mais os valores da altura da lâmina d'água e do recobrimento dos poços de visitas se aproximaram dos valores de referência, maior foi a eficiência e a economia do projeto.

Palavras chave: Equações de Saint-Venant, SWMM, drenagem pluvial, modelo numérico, regime uniforme, regime variado

ABSTRACT

The events related to the climate, the impermeable increase of basins and the lack of investments in the area are factors that contribute with the increasingly necessity of thinking about the flow of rainwater. In Brazil, the reality of urban drainage is still critical and there is no regulation that guides its dimensioning. Traditionally, the Rational Method is used in the dimensioning of urban drainage networks, based on the calculation of maximum project flows. Although it is still a widely used method in the country, some literatures consider that this simplification is not adequate in channel hydraulics and suggest the use of Saint-Venant equations for this calculation. To solve them, it is necessary to use numerical models and, for this work, Storm Water Management Model (SWMM) was used. With the aid of this tool, a simulation of the flow and optimization of urban drainage galleries of an existing project was carried out, which used the Rational Method in its original dimensioning. Through the simulation, it was noticed a variation of about 20.12% between the flow calculation methods, which the Rational Method presented the lowest values. Furthermore, it was noticed that the proposed design, considering a manual optimization model of the galleries, through an iterative method, presented a reduced cost compared to the original project. It was concluded that, with the solution of the Saint-Venant equations through SWMM, the results are closer to the reality of the flow in galleries. It is also noted that the more the values for the height of the water depth and the coverage of the manholes approached the reference values, the greater the efficiency and economy of the project.

Keywords: Saint-Venant equations, SWMM, rainwater drainage, numerical model, uniform regime, varied regime

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
1 INTRODUÇÃO	8
2 MATERIAIS E MÉTODOS	10
2.1 Área de estudo	10
2.2 Equações de Saint-Venant	11
2.3 Modelo numérico <i>Storm Water Management Model</i> (SWMM)	12
2.4 Simulação do escoamento nos sistemas de galerias de drenagem	15
2.5 Otimização dos sistemas de galerias de drenagem	17
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1 Simulação do escoamento nos sistemas de galerias de drenagem	23
3.2 Otimização do projeto utilizando o SWMM	25
4 CONCLUSÕES	28
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Localização da área em estudo	10
Figura 2 - Trecho para o qual se realizou as simulações numéricas do escoamento nas galerias de drenagem	11
Figura 3 - Recorte do laudo de sondagem da área de estudo	14
Figura 4 - Traçado do trecho simulado no SWMM	16
Figura 5 - Fluxograma da metodologia para otimização das galerias a partir da variação do diâmetro dos trechos	18
Figura 6 - Fluxograma da metodologia para otimização das galerias a partir da variação da declividade dos trechos	19
Figura 7 - Fluxograma da metodologia para otimização das galerias a partir da variação do diâmetro e da declividade dos trechos	21
Figura 8 - Comparação entre os valores de vazões obtidos no projeto original (regime uniforme) e nas simulações do SWMM (regime variado)	23
Figura 9 - Comparação entre os valores de y/D obtidos no projeto original (regime uniforme) e nas simulações do SWMM (regime variado)	24
Figura 10 - Comparação entre os valores de velocidade obtidos no projeto original (regime uniforme) e nas simulações do SWMM (regime variado)	24
Figura 11 - Orçamentos do sistema de galerias com base nas otimizações	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1_ - Tipos de solo	13
Tabela 2_ - Valores de CN para bacias urbanas.....	14
Tabela 3_ - Dados geométricos e hidráulicos do projeto inserido no SWMM	16
Tabela 4_ - Dados hidrológicos do projeto inserido no SWMM	17
Tabela 5_ - Dados adotados no SWMM referentes às sub-bacias	17
Tabela 6 - Valores de referência de velocidade, recobrimento e y/D	18
Tabela 7 - Resultado dos valores de diâmetros e recobrimento adotados.....	25
Tabela 8 - Resultado do processo de otimização dos trechos das galerias.....	26

1 INTRODUÇÃO

Tucci e Chagas (2018) apontam que, no período de 1994 a 2003, 50% dos impactos referentes aos desastres naturais ocorridos em nível mundial foram devido às inundações. Assim, observa-se o alto risco que a sociedade está exposta, uma vez que faltam ações de mitigação para os problemas, planejamento e integração entre os órgãos competentes ao gerenciamento da infraestrutura urbana (Batista e Boldrin 2018). Dentre os fatores que colaboram para esse cenário mundial está a falta de recursos destinados à melhoria na drenagem urbana, visto que reduzir ou mitigar os impactos das inundações é oneroso. Além disso, Alvarez et. al. (2020) atentam para o efeito do aumento da impermeabilização das bacias hidrográficas, o que contribui para o elevado número de casos de inundações. Existe também uma grande preocupação quanto ao aumento no número de eventos relacionados ao clima nas últimas décadas, sendo o fenômeno percebido em escala global (Jansen et al. 2021).

Nesse contexto, quando se avalia a gestão e planejamento dos serviços de drenagem urbana no Brasil, percebe-se que a questão é bem crítica. Segundo o diagnóstico realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019), em 2017, menos de 20% dos municípios participantes, que abrigam 83,8% da população urbana, possuíam Plano Diretor de Drenagem. Ademais, conforme a Pesquisa de Informações Básicas Municipais (IBGE, 2017), apenas pouco mais de 30% dos municípios brasileiros possui Plano Municipal de Saneamento Básico, abrangendo os serviços de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. Ou seja, a situação da drenagem urbana no Brasil é preocupante, sendo que as obras nessa área são fundamentais para a diminuição dos problemas ocasionados pelas inundações.

No Brasil, uma das primeiras referências no dimensionamento dos sistemas de drenagem urbana foi Wilken (1978), com a utilização do Método Racional para o cálculo das vazões máximas de projeto. Para se fazer uso desse método no dimensionamento das galerias, considera-se que o escoamento, em virtude da precipitação, ocorre no movimento permanente uniforme, a fim de simplificar o cálculo das vazões. Entretanto, apesar de muito empregada, Simões et al. (2011) consideram que essa simplificação não é adequada na hidráulica de canais. Por isso, Oliveira et al. (2016) recomendam o uso das

equações de Saint-Venant e a apontam para a necessidade da aplicação de modelos hidrodinâmicos para esse cálculo. Tal recomendação se deve ao fato de que estes modelos são baseados em métodos iterativos e são capazes de simular as vazões de escoamento no regime variado, mais próximo da realidade de canais.

Atualmente, existem vários *softwares* com essa capacidade, sendo que um deles é o *Storm Water Management Model (SWMM)*. Carvalho et al. (2018) e Guimarães, (2009) utilizaram o SWMM e compararam as vazões calculadas pelos dois métodos (regime uniforme e regime variado), comprovando as variações entre eles, o que leva a uma reflexão acerca do uso do Método Racional e as suas limitações.

Evidentemente, é um consenso que as obras de drenagem urbana necessitam de um alto investimento, desde a sua concepção, implementação e manutenção (Tucci e Chagas, 2018). Por esse motivo, é importante que o seu dimensionamento atenda com técnica, segurança e economia as necessidades da população. Nesse contexto, é importante pensar na otimização dos parâmetros hidráulicos e geométricos do sistema ainda no seu dimensionamento a fim de se alcançar a máxima eficiência e economia no projeto. Bohnenberger et al. (2019) propuseram uma modelagem numérica vetorial para a otimização de um sistema de galerias de drenagem urbana. Os autores concluíram que a modelagem proposta contribuiu para a economia no projeto e melhora na sua eficiência.

Entretanto, em muitos projetos de drenagem urbana a otimização não é realizada, por tradicionalmente ser um processo iterativo complexo e que demanda tempo. Diante disso, a solução alternativa proposta neste trabalho é a utilização do SWMM, o qual se apresenta como uma ferramenta que viabiliza a simulação e otimização de projetos de drenagem urbana. Alguns trabalhos já sinalizam para simulações de escoamento bem-sucedidas no uso do SWMM, como o das sub-bacias do perímetro urbano de Sobral, no Ceará, apresentado por Lima et al. (2017) e o da bacia urbana do Córrego Sem Nome em Ilha Solteira, São Paulo, apresentado por Júnior (2018). Porém, a originalidade do presente trabalho consiste no auxílio dessa ferramenta também no processo de otimização do dimensionamento de galerias.

Assim sendo, os objetivos deste trabalho foram (i) simular as galerias de um sistema de drenagem utilizando o SWMM, o qual é um modelo numérico que resolve as equações de Saint-Venant; e (ii) propor uma metodologia de otimização de galerias, utilizando o mesmo programa.

Figura 2 - Trecho para o qual se realizou as simulações numéricas do escoamento nas galerias de drenagem



Fonte: Adaptado de Ideal Consultoria Júnior, 2017.

2.2 Equações de Saint-Venant

Tratando-se da hidráulica de canais, as equações de Saint-Venant são muito utilizadas como método de cálculo de vazões (Oliveira et al. 2016). As equações são formadas pelas expressões de conservação de massa e de momento e seu uso aproxima o cálculo das vazões à realidade do escoamento, descrito como variado (Ferreira et al., 2017). Júnior (2018) descreve as equações da conservação de massa (Equação 1) e da quantidade de movimento (Equação 2) da seguinte forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{Equação 1})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f - gAS_0 = 0 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

- x é a distância na direção do escoamento (m);
- t é o tempo (s);
- A é a área molhada da seção transversal (m²);
- Q é a vazão (m³/s);
- h é a profundidade da lâmina líquida (m);
- g é a aceleração da gravidade (m/s²);
- S_0 é a declividade de fundo do canal; e
- S_f é a declividade da linha de energia.

As Equações 1 e 2 são matematicamente classificadas como diferenciais parciais hiperbólicas, sendo necessários processos iterativos para as suas resoluções. Por esse motivo, é importante o uso de métodos numéricos para obtenção dessas soluções, mesmo esse uso sendo ainda pouco usual (Simões et al. 2011). Um modelo numérico que resolve as equações de Saint-Venant é o SWMM, o qual foi utilizado neste trabalho e permite a simulação e a otimização com base no escoamento variado.

2.3 Modelo numérico *Storm Water Management Model* (SWMM)

O SWMM foi desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), agência norte-americana encarregada pelo Congresso dos Estados Unidos da América para proteger os recursos naturais do país (USEPA, 2010). Ele possui uma interface interativa e de pouca complexidade no que diz respeito à entrada das variáveis. Após a inserção dos dados de entrada, o *software* permite: a simulação do comportamento hidrológico-hidráulico; o cálculo da quantidade e da qualidade da água; e a apresentação dos resultados da simulação em várias formas (Júnior 2018 e Lima et al. 2017). Os resultados das simulações no SWMM são observados por meio de gráficos e tabelas de séries temporais, diagramas de perfil, dentre outras formas (Peplau e Neves, 2014). A grande vantagem de utilização desse *software* é que este simula o comportamento do sistema de drenagem com mais fidelidade, uma vez que é capaz de aplicar, rapidamente, métodos iterativos na resolução das equações de Saint-Venant, em que o escoamento obedece a um regime não-uniforme (Oliveira et al. 2016).

Para possibilitar a simulação de um evento de chuva no SWMM, é necessário configurar o *software* com algumas informações iniciais, de acordo com o objetivo da simulação. USEPA (2010) apresenta que há três formas de simular no SWMM o transporte hidráulico nas galerias do sistema de drenagem: o modelo considerando o fluxo em regime uniforme, o modelo da onda cinemática e o modelo da onda dinâmica. De acordo com Silva (2016), o modelo que oferece os resultados mais precisos é o da onda dinâmica, uma vez que este é capaz de resolver as equações completas unidimensionais de Saint-Venant. Esse modelo pode levar em conta o armazenamento nas galerias, o ressalto hidráulico, as perdas nas entradas e saídas das galerias, o remanso e o fluxo pressurizado.

USEPA (2010) também cita três modelos de infiltração para a simulação do escoamento no SWMM, sendo eles: método de Horton, método Green-Ampt e o método

Soil Conservation Service (SCS). Dentre os modelos citados, Paulino (2014) observam que o uso do método SCS requer menos dados de entrada e se trata de uma metodologia mais simples. Para tanto, o método SCS possibilita estimar a parcela da precipitação efetiva que gera o escoamento.

As Equações 3 e 4, apresentadas por Soares et al. (2017), expressam a vazão de escoamento (Q) e a capacidade de armazenamento do solo (S) por meio do método SCS.

$$Q = \frac{(P - 0,3 S)^2}{P + 0,7 S} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$S = \left(\frac{25400}{CN} \right) - 254 \quad \text{(Equação 4)}$$

Sendo:

- *P* é a precipitação, em mm; e
- *CN* é o parâmetro denominado Número da Curva.

Assim, para ser possível calcular o valor de “*Q*”, há a necessidade de se estabelecer o parâmetro “*CN*”, o qual pode ser obtido por meio das Tabelas 1 e 2 e é baseado no tipo de solo e nas suas condições de uso e ocupação. Neste contexto, para encontrar o valor do “*CN*” adequado para as simulações realizadas neste trabalho, fez-se uso de um laudo de sondagem (Figura 3) referente a um dos lotes do condomínio utilizado como área de estudo.

Tabela 1 - Tipos de solo

Tipo de solo	Característica
A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.
B	Solos menos permeáveis que o anterior, solos arenosos menos profundos que o tipo A e com permeabilidade superior à média.
C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo porcentagem considerável de argila e pouco profundo.
D	Solos contendo argila e pouco profundos com baixa capacidade de infiltração, gerando maior proporção de escoamento superficial.

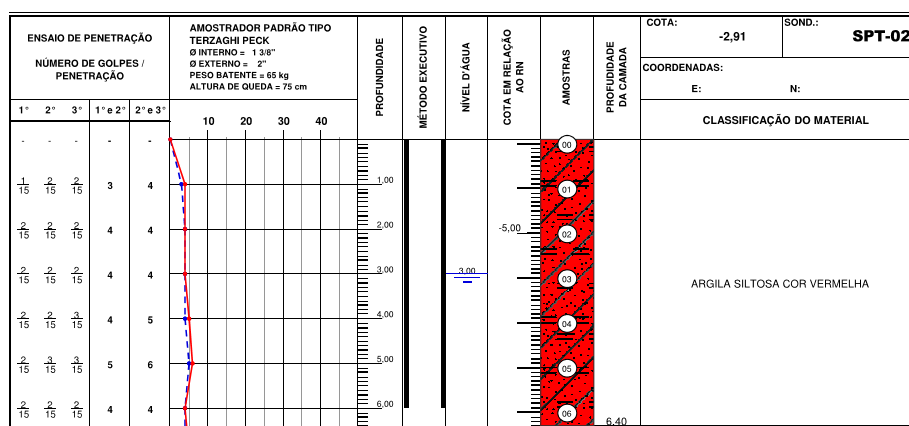
Fonte: Adaptado de Tucci, 2002.

Tabela 2_- Valores de CN para bacias urbanas

Utilização ou ocupação do solo (Zonas residenciais)		Tipo de solo			
Lotes (m ²)	% média impermeável	A	B	C	D
<500	65	77	85	90	92
1000	38	61	75	83	87
1300	30	57	72	81	86
2000	25	54	70	80	85
4000	20	51	68	79	84

Fonte: Adaptado de Tucci, 2002.

Figura 3 - Recorte do laudo de sondagem da área de estudo



Fonte: Adaptado de Bate&Sonda, 2019.

No que diz respeito à metodologia de cálculo, o SWMM emprega a equação de Manning (Equação 5) quando os condutos fechados trabalham parcialmente cheios (USEPA, 2010).

$$Q = \frac{ARh^{2/3}\sqrt{S}}{n} \quad \text{(Equação 5)}$$

Em que:

- Q é a vazão que escoar pelo conduto (m³/s);
- A é a área da seção transversal (m²);
- Rh é o raio hidráulico (m); e
- S é a declividade da linha de energia.

Quando os condutos de seção circulares funcionam em carga, a vazão é calculada pela equação de Hazen-Williams ou pela equação de Darcy-Weisbach (USEPA, 2010). Porto (2006) sugere uso da equação de Hazen-Williams (Equação 6) para este fim.

$$J = 10,65 \frac{Q^{1,85}}{C^{1,85} D^{4,87}} \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo:

- J é a perda de carga unitária (m/m);
- Q é a vazão (m³/s);
- C é o coeficiente de rugosidade; e
- D é o diâmetro (m).

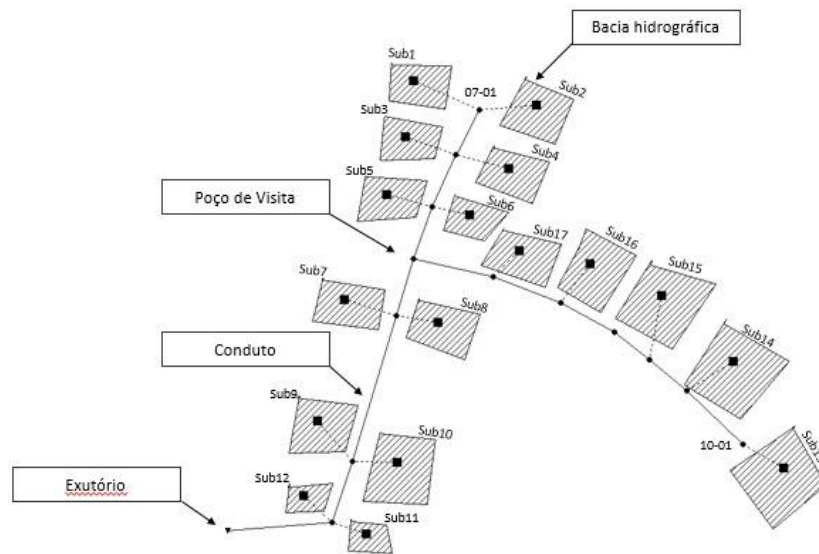
Por fim, após a seleção dos métodos iniciais de cálculo da vazão de escoamento, é necessário inserir no SWMM os dados referentes à hidrologia e hidráulica da rede. Assim, posteriormente, o programa simulará um evento de chuva, como fizeram Júnior (2018) e Lima et al. (2017) apontando para a obtenção de resultados satisfatórios neste procedimento.

2.4 Simulação do escoamento nos sistemas de galerias de drenagem

De maneira análoga à Carvalho et al. (2018) e Guimarães (2009), foi feita uma simulação no SWMM do projeto de drenagem do condomínio e compararam-se as vazões de escoamento obtidas através dos dois métodos de dimensionamento: pelo Método Racional, utilizado no projeto original, e pelas Equações de Saint-Venant, utilizada na simulação pelo *software*.

Inicialmente, após a configuração inicial do *software*, detalhada no item 4.3, o primeiro passo para a simulação do escoamento devido a um evento de chuva foi traçar o sistema de drenagem da área analisada. Para tanto, foi traçado o detalhe de estudo proposto pelo projeto original. Esse detalhe tem início em duas pontas secas e deságua na lagoa central, ponto exutório do trecho. A escolha do detalhe a ser simulado se deu devido a maior complexidade do trecho, com interseção, contra-greide e grande variação de altitude. Na Figura 4 está apresentado o traçado inicial inserido no SWMM, com a especificação das simbologias.

Figura 4 - Traçado do trecho simulado no SWMM



Fonte: Autor.

Após o traçado do sistema, o próximo passo foi inserir os dados hidrológicos e hidráulicos no *software*. Para fins de comparação, os cálculos das vazões de entrada nas galerias e canais do sistema de drenagem do *software* foram feitos a partir dos mesmos dados geométricos e de precipitação adotados no projeto original. Os dados estão apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5. Após a inserção desses dados, o SWMM foi capaz de concluir a simulação do escoamento.

Tabela 3 - Dados geométricos e hidráulicos do projeto inserido no SWMM

Trecho	Extensão (m)	Cota do nó a montante (m)	Cota do nó a jusante (m)	Diâmetro (mm)	Manning
07-01	30,00	949,641	949,491	300	0,013
07-02	30,00	949,391	949,241	400	0,013
07-03	36,63	949,191	949,008	450	0,013
07-04	23,37	949,008	947,329	450	0,013
07-05	60,00	947,329	936,172	450	0,013
07-06	20,00	936,172	932,146	450	0,013
07-07	14,30	932,096	930,272	450	0,013
10-01	55,00	971,541	964,192	200	0,013
10-02	45,00	964,192	959,710	250	0,013
10-03	15,00	959,710	958,656	300	0,013
10-04	15,00	958,656	958,026	300	0,013
10-05	30,00	958,026	955,895	400	0,013
10-06	46,00	955,895	951,312	400	0,013

Fonte: Autor.

Tabela 4 - Dados hidrológicos do projeto inserido no SWMM

Sub-bacias	Área (ha)	Largura (m)	Pluviômetro (mm)	%Declividade
Sub1	0,0923	19,0	167,0	3,68
Sub2	0,0813	19,0	167,0	3,68
Sub3	0,0832	19,0	168,0	3,04
Sub4	0,0918	19,0	168,0	3,04
Sub5	0,0928	19,0	164,0	0,43
Sub6	0,0703	19,0	164,0	0,43
Sub7	0,0682	19,0	169,0	16,83
Sub8	0,0895	19,0	169,0	16,83
Sub9	0,1444	19,0	168,0	18,59
Sub10	0,1393	19,0	168,0	18,59
Sub11	0,0478	19,0	169,0	20,00
Sub12	0,0458	19,0	169,0	20,00
Sub13	0,2057	19,0	168,0	15,80
Sub14	0,1904	19,0	168,0	13,40
Sub15	0,1552	19,0	168,0	10,00
Sub16	0,1121	19,0	168,0	5,30
Sub17	0,1291	19,0	168,0	7,10

Fonte: Adaptado de Ideal Consultoria Júnior, 2017.

Tabela 5 - Dados adotados no SWMM referentes às sub-bacias

%Impermeável	80,0
n-Impermeável	0,013
n-Permeável	0,150
PA-Impermeável	0,410
PA-Permeável	5,770
%Área. imp s/ armazenamento	25,0
Propag. Escoamento	<i>Outlet</i>
%Propagada	100,0
Modelo de infiltração	SCS

Fonte: Autor.

2.5 Otimização dos sistemas de galerias de drenagem

Após a simulação, avaliou-se a utilização do SWMM na otimização dos parâmetros hidráulicos e geométricos do sistema. Em busca do par diâmetro-inclinação ótimo de cada trecho, foram avaliados os valores de y/D , recobrimento e velocidade de escoamento, a partir das variações dos valores de diâmetros e cota dos poços de visitas (PVs). Para isso, foram utilizados os valores de referência adotados pela Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) (2017), apresentados na Tabela 6.

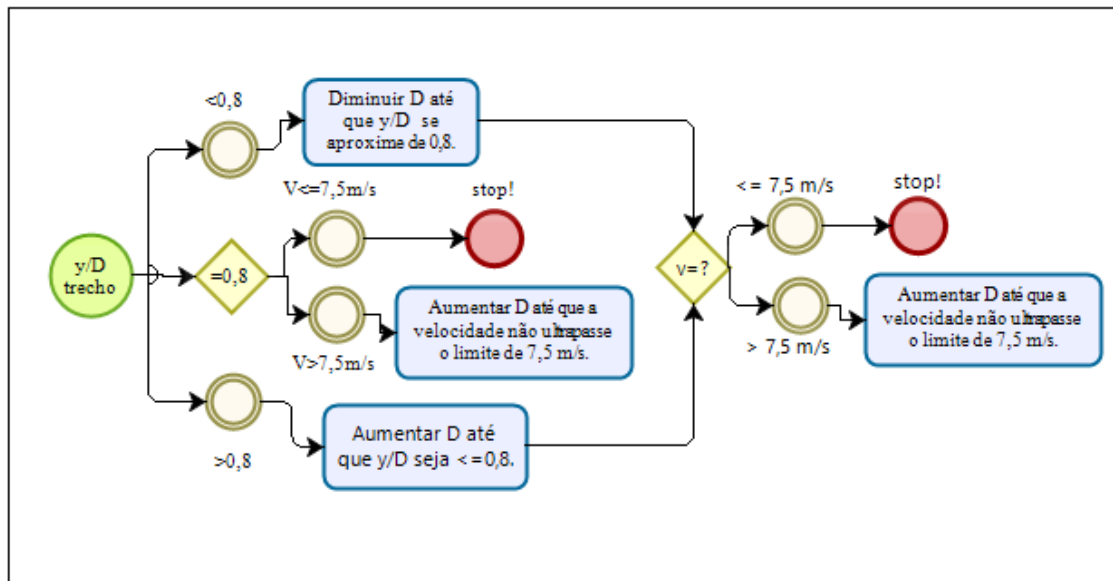
Tabela 6 - Valores de referência de velocidade, recobrimento e y/D

Velocidade (m/s)		Recobrimento (m)		Relação y/D		Referência
V _{mín}	V _{máx}	R _{mín}	R _{máx}	y/D _{mín}	y/D _{máx}	
0,75	7,00	1,00	4,00	0,5	0,94	Bohnenberger (2019)
0,75	7,50	0,80	-	-	0,80	PBH (2017)
1,00	6,10	-	-	-	Plena	UDFCD (2016)
0,80	4,00	0,80	-	-	0,75	PMJ (2011)

Fonte: Adaptado de Bohnenberger et al. 2019.

Para a otimização dos trechos, visando os valores de referência adotados pela PBH (2017), foram adotadas três metodologias: (i) variação nos diâmetros; (ii) variação nas inclinações dos trechos; e (iii) variação nos diâmetros e nas inclinações dos trechos. As Figuras 5, 6, 7 apresentam os fluxogramas das metodologias desenvolvidas e propostas neste trabalho.

Figura 5 - Fluxograma da metodologia para otimização das galerias a partir da variação do diâmetro dos trechos



Fonte: Autor.

Conforme descrito na Figura 5, em um primeiro momento, foi avaliada a sensibilidade na alteração apenas dos diâmetros (D) que foram estabelecidos em projeto. Ao se alterar os valores de “D” no processo, fez-se considerando o próximo diâmetro nominal comercial, superior ou inferior. Nesse processo, utilizaram-se das máximas referências da PBH (2017) apresentadas na Tabela 6. A partir disso:

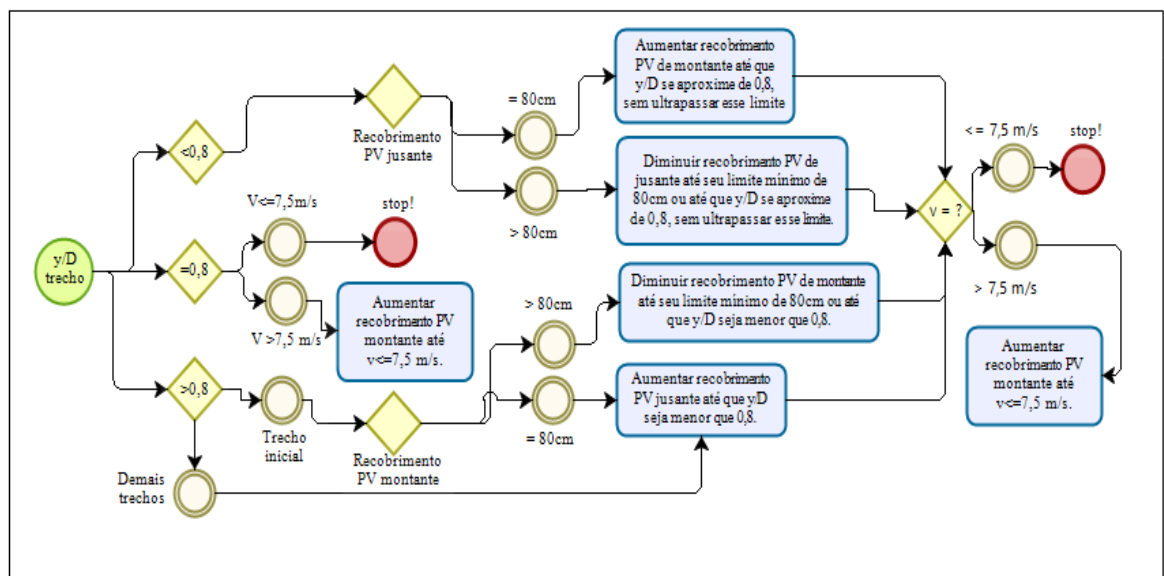
a) Caso y/D se igualasse à 0,8, analisava-se o valor da velocidade, sendo que: (i) se esta fosse menor que 7,5 m/s, o trecho encontrava-se em sua capacidade máxima e o

processo era finalizado; (ii) se esta fosse maior que 7,5 m/s, aumentava-se D até que a velocidade de escoamento fosse igual ou inferior a de referência.

b) Caso y/D fosse maior que 0,8, aumentava-se D até que y/D fosse menor ou igual a 0,8. Posteriormente, avaliava-se o valor da velocidade, conforme descrito no item (a).

c) Caso y/D fosse menor que 0,8, o diâmetro era diminuído até que y/D se aproximasse de 0,8, sem ultrapassar esse limite. Posteriormente, avaliava-se o valor da velocidade, conforme descrito no item (a).

Figura 6 - Fluxograma da metodologia para otimização das galerias a partir da variação da declividade dos trechos



Fonte: Autor.

Conforme apresentado na Figura 6, a segunda metodologia avaliou a sensibilidade na mudança apenas dos valores de declividade, através da alteração das cotas dos PVs. Ao se alterar os valores das cotas do PVs no processo, fez-se considerando intervalos a cada 10 cm, mais alto ou mais baixo da cota inicial proposta no projeto. E, assim como no processo anterior, buscou-se uma aproximação dos valores de referência da PBH (2017), apresentadas na Tabela 6. A partir disso:

a) Caso y/D se igualasse à 0,8, analisava-se o valor da velocidade, sendo que: (i) se esta fosse menor que 7,5 m/s, o trecho encontrava-se em sua capacidade máxima e o processo era finalizado; (ii) se essa fosse maior que 7,5 m/s, aumentava-se o recobrimento

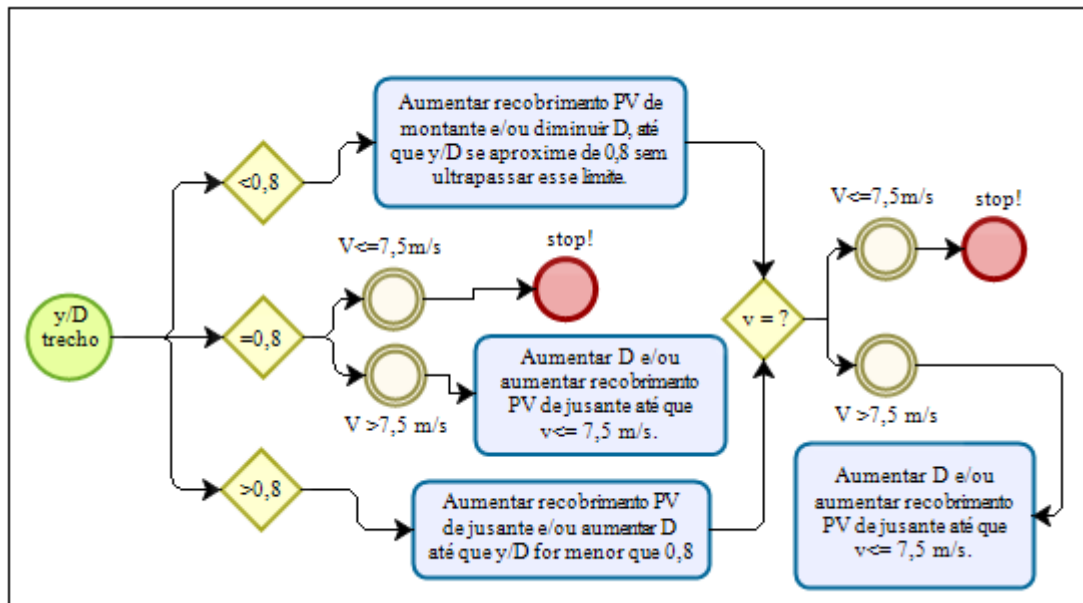
do PV de montante até que a velocidade de escoamento fosse igual ou inferior a de referência.

b) Caso y/D do trecho fosse menor que 0,8, verificava-se o valor do recobrimento do PV de jusante desse trecho, sendo que: (i) se este fosse maior que 80 cm, teria seu valor diminuído até seu limite mínimo de 80 cm ou até que y/D se aproximasse de 0,8, sem ultrapassar esse limite. Neste último caso, posteriormente, avaliava-se o valor da velocidade, conforme descrito no item (a); (ii) se este fosse igual à 80 cm, aumentava-se, então, o valor do recobrimento do PV de montante do trecho até que y/D se aproximasse de 0,8, sem ultrapassar esse limite. Posteriormente, avaliava-se o valor da velocidade, conforme descrito no item (a).

c) Caso y/D do trecho fosse maior que 0,8, era analisada, inicialmente, a localização do trecho:

- Para o trecho inicial, ou seja, o mais a montante, verificava-se o valor do recobrimento do PV de montante desse trecho, sendo que: (i) se este fosse maior que 80 cm, teria seu valor diminuído até seu limite mínimo de 80 cm ou até que y/D fosse menor que 0,8. Posteriormente, avaliava-se o valor da velocidade, conforme descrito no item (a); (ii) se este fosse igual à 80 cm, aumentava-se, então, o valor do recobrimento do PV de jusante do trecho até que y/D fosse menor que 0,8. Posteriormente, avaliava-se o valor da velocidade, conforme descrito no item (a);
- Para os demais trechos, aumentava-se, então, o valor do recobrimento do PV de jusante do trecho era aumentado até que y/D fosse menor que 0,8. Posteriormente, avaliava-se o valor da velocidade, conforme descrito no item (a).

Figura 7 - Fluxograma da metodologia para otimização das galerias a partir da variação do diâmetro e da declividade dos trechos



Fonte: Autor.

Enfim, conforme apresentado na Figura 7, a última metodologia avaliou a sensibilidade na mudança tanto nos valores dos diâmetros, quanto nos valores dos recobrimentos dos PVs. Ao se alterar os valores de “D” no processo, fez-se considerando o próximo diâmetro nominal comercial, superior ou inferior; e, ao se alterar os valores das cotas do PVs no processo, fez-se considerando intervalos a cada 10 cm, mais alto ou mais baixo da cota inicial proposta no projeto. Assim como nos demais processos, buscou-se uma aproximação dos valores de referência da PBH (2017), apresentadas na Tabela 6. Inicialmente, adotou-se o recobrimento mínimo de 80 cm em todos os PVs e, posteriormente, analisou-se o resultado de y/D em cada trecho. A partir disso:

a) Caso y/D se igualasse à 0,8, analisava-se o valor da velocidade, sendo que: (i) se essa fosse menor que 7,5 m/s, o trecho encontrava-se em sua capacidade máxima e o processo era finalizado; (ii) se essa fosse maior que 7,5 m/s, aumentava-se D e/ou aumentava-se o recobrimento do PV de jusante, até que a velocidade de escoamento fosse igual ou inferior a de referência.

b) Caso y/D do trecho fosse menor que 0,8, aumentava-se o valor do recobrimento do PV de montante do trecho e/ou diminuía-se “D” até que y/D se aproximasse de 0,8, sem ultrapassar esse limite. Posteriormente, avaliava-se o valor da velocidade, conforme descrito no item (a). Ressalta-se que, sempre que possível, dava-se prioridade para a

diminuição de “ D ” ao invés do aumento do recobrimento do PV de montante, pois, assim, o valor do projeto fica menor.

c) Caso y/D do trecho fosse maior que 0,8, aumentava-se o valor do recobrimento do PV de jusante do trecho e/ou aumentava-se “ D ” até que y/D fosse menor que 0,8. Posteriormente, avaliava-se o valor da velocidade, conforme descrito no item (a).

Como mencionado, para o processo de otimização descrito nos fluxogramas apresentados, utilizou-se das referências adotadas pela PBH (2017). Porém, por meio da Tabela 6, observa-se que no Brasil há várias referências para o dimensionamento de redes de drenagem urbana. Por esse motivo, percebe-se a importância de se estabelecer uma normativa que concentre todas as diretrizes desse processo, como aponta Silva (2016). Somado a isso, é importante que os parâmetros adotados em projeto sejam otimizados ainda nessa fase, buscando o par diâmetro-inclinação ótimo de cada trecho, a fim de se garantir maior eficiência e economia em sua execução.

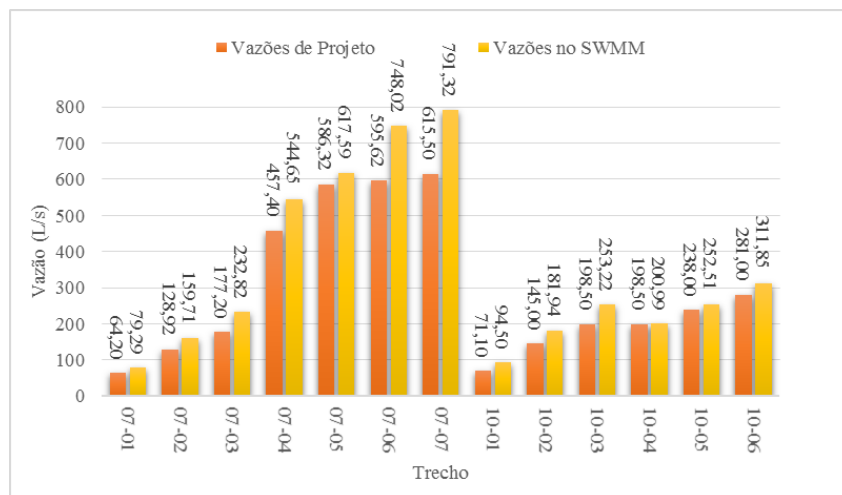
As referências orçamentárias disponibilizadas pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) de fevereiro de 2021 auxiliaram na avaliação das variações e nas tomadas de decisões. Ao final do processo, a título de comparação, foram gerados quatro orçamentos: (i) projeto original do sistema de galerias do condomínio; (ii) otimização das galerias variando o diâmetro; (iii) otimização das galerias variando a declividade dos trechos; e (iv) otimização das galerias variando diâmetro e declividade dos trechos. Para tanto, foram considerados no orçamento os tubos de concreto, bem como os serviços de escavação mecanizada e assentamento dos tubos. Tais variáveis levam em consideração o volume escavado e o diâmetro da tubulação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Simulação do escoamento nos sistemas de galerias de drenagem

Após inserir todas as informações iniciais necessárias, o SWMM foi capaz de simular um evento de chuva e apresentou os resultados em vários formatos, como tabelas, gráficos e perfis. De posse desses valores, foi possível comparar os resultados originais no projeto do sistema de galerias do condomínio, o qual utilizou o Método Racional (regime uniforme) para o dimensionamento, com os obtidos no SWMM, o qual considera o regime como variado e resolve as equações de Saint-Venant. As variáveis comparadas foram a vazão (Figura 8), a lâmina d'água (Figura 9) e a velocidade (Figura 10).

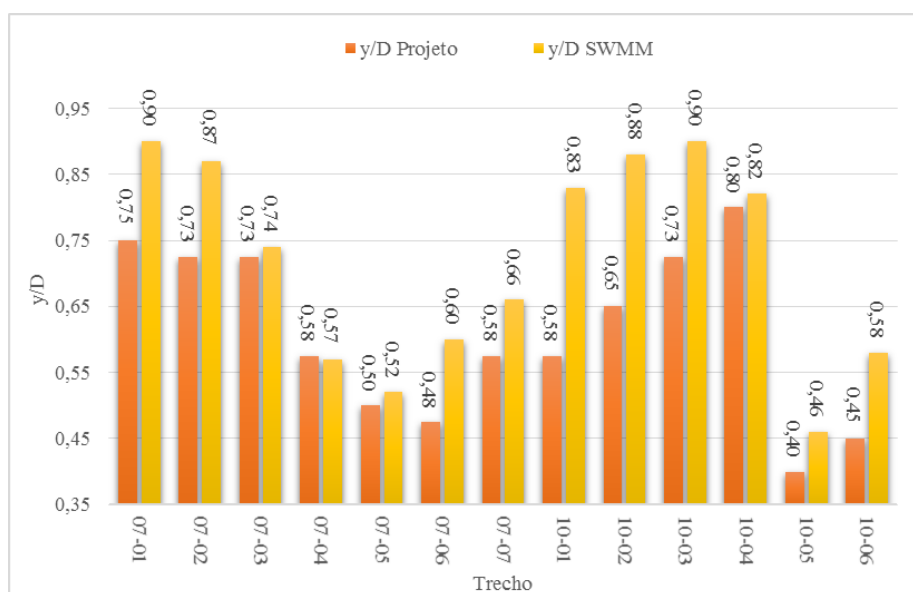
Figura 8 - Comparação entre os valores de vazões obtidos no projeto original (regime uniforme) e nas simulações do SWMM (regime variado)



Fonte: Autor.

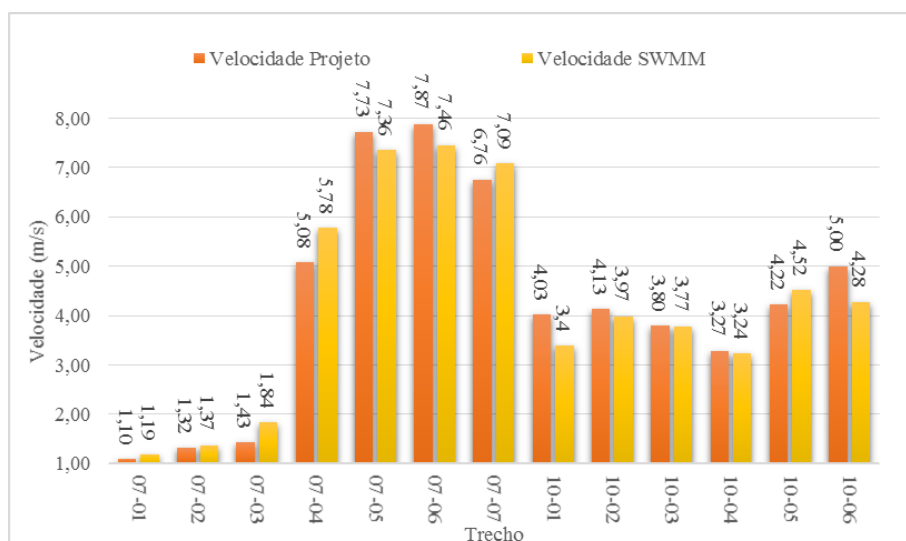
De acordo com a Figura 8, percebe-se que as vazões obtidas no SWMM assumiram valores, em média, 20,12% maiores que as vazões calculadas no projeto original do sistema de galerias do condomínio. De maneira análoga, Guimarães (2009) obteve resultados próximos para uma comparação similar, em um estudo que identificou que para um mesmo coletor foram apresentadas diferenças entre os valores de vazão, nos dois métodos, que chegaram a 40%. Já Carvalho et al. (2018) apresentaram valores aproximados entre as vazões calculadas pelos dois métodos. Assim, é evidente a necessidade de se estabelecer uma normativa que conduza o dimensionamento, de modo a apontar a melhor metodologia a ser utilizada no cálculo das vazões.

Figura 9 - Comparação entre os valores de y/D obtidos no projeto original (regime uniforme) e nas simulações do SWMM (regime variado)



Fonte: Autor.

Figura 10 - Comparação entre os valores de velocidade obtidos no projeto original (regime uniforme) e nas simulações do SWMM (regime variado)



Fonte: Autor.

A partir da análise das Figuras 9 e 10, percebe-se que o dimensionamento apresentado pelo projeto original é visto como ineficiente quando simulado no SWMM, uma vez que alguns valores não atenderam ao recomendado na literatura técnica, a qual está apresentada na Tabela 6. Nessa tabela, analisando os valores de referência utilizados pela PBH (2017), observa-se que nos resultados obtidos na simulação do projeto no SWMM, há valores de y/D e velocidades de escoamento acima do recomendado. Por exemplo, nos

trechos 07-01, 07-02, 10-01 a 10-04 da Figura 9, é possível perceber que os valores de y/D ultrapassaram o limite estabelecido pela PBH (2017), o qual é de 0,8. Na Figura 10, percebe-se que no projeto original do sistema de drenagem do condomínio já há trechos, como o 07-05 e o 07-06, que não atendiam ao limite de velocidade estabelecido pela PBH (2017), o qual é de 7,5 m/s.

3.2 Otimização do projeto utilizando o SWMM

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados dos processos de otimização dos trechos das galerias, sendo que os processos foram realizados utilizando as três metodologias descritas nos fluxogramas das Figuras 5, 6 e 7. Na Tabela 7, encontram-se os valores dos diâmetros e recobrimentos finais adotados após os processos de otimização dos trechos da galeria.

Tabela 7 - Resultado dos valores de diâmetros e recobrimento adotados

Trecho	Diâmetro (mm)			Recobrimento (m)					
	Otimização declividade	Otimização diâmetro	Otimização declividade e diâmetro	Otimização declividade		Otimização diâmetro		Otimização declividade e diâmetro	
				M	J	M	J	M	J
07-01	300	300	350	0,80	2,16	0,80	2,16	0,80	2,16
07-02	400	500	300	2,16	3,27	2,16	3,27	2,16	3,27
07-03	450	500	450	3,27	3,60	3,27	3,60	3,27	3,60
07-04	450	400	300	3,60	1,35	3,60	1,35	3,60	1,35
07-05	450	350	300	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35	1,35
07-06	450	400	300	1,35	1,40	1,35	1,40	1,35	1,40
07-07	450	450	400	1,40	1,35	1,40	1,35	1,40	1,35
10-01	200	200	200	1,23	0,80	1,23	1,23	1,23	0,80
10-02	250	250	300	0,80	0,80	1,23	1,20	0,80	0,80
10-03	300	350	350	0,80	1,33	1,20	1,33	0,80	1,33
10-04	300	350	350	1,33	1,00	1,33	1,30	1,33	1,00
10-05	400	350	350	1,00	1,30	1,30	1,30	1,00	1,30
10-06	400	350	350	1,30	3,60	1,30	3,60	1,30	3,60

Legenda: M – Montante; J – Jusante.

Fonte: Autor.

Na Tabela 8, encontram-se os resultados finais de y/D e velocidades após a otimização realizada no SWMM. É possível observar que a otimização atendeu aos critérios de y/D e de velocidade recomendados.

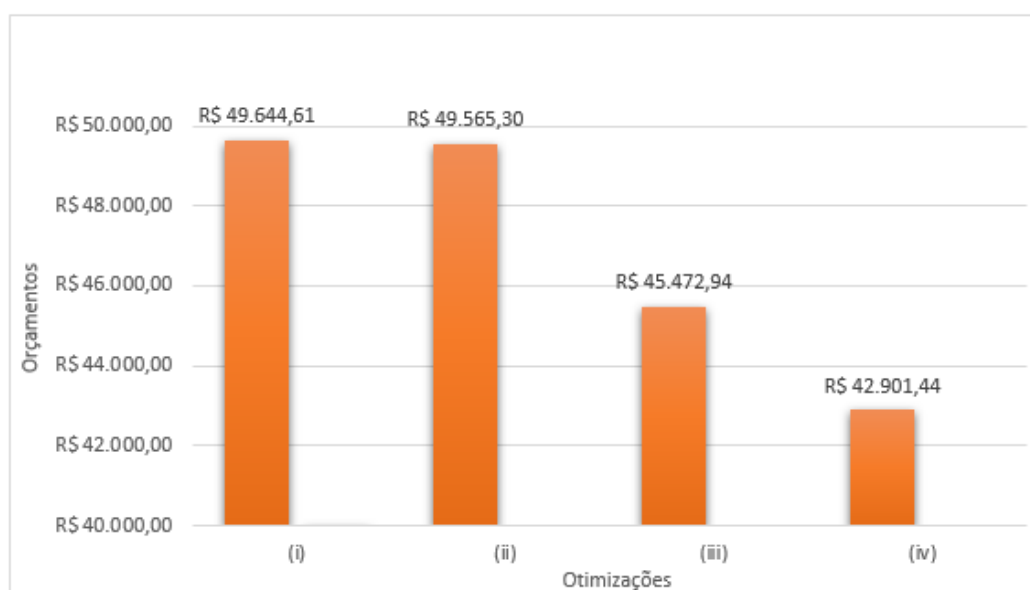
Tabela 8 - Resultado do processo de otimização dos trechos das galerias

Trecho	y/D			Velocidade (m/s)		
	Otimização declividade	Otimização diâmetro	Otimização declividade e diâmetro	Otimização declividade	Otimização diâmetro	Otimização declividade e diâmetro
07-01	0,80	0,80	0,77	1,19	1,30	1,00
07-02	0,77	0,61	0,80	1,37	1,26	1,18
07-03	0,74	0,69	0,70	1,84	1,62	1,21
07-04	0,57	0,78	0,80	5,78	5,29	3,51
07-05	0,52	0,80	0,73	7,36	7,48	5,27
07-06	0,60	0,71	0,78	7,46	7,40	7,02
07-07	0,66	0,67	0,53	7,09	7,11	6,74
10-01	0,79	0,79	0,74	3,45	3,40	3,74
10-02	0,72	0,80	0,64	4,24	4,28	3,83
10-03	0,80	0,65	0,66	3,95	3,83	3,79
10-04	0,77	0,70	0,69	2,65	3,54	3,56
10-05	0,46	0,63	0,62	4,52	4,74	4,83
10-06	0,58	0,79	0,78	4,28	4,48	4,53

Fonte: Autor.

Visando apresentar a importância da otimização dos sistemas de galerias de drenagem urbana ao comparar as três metodologias de otimização propostas, foram elaborados quatro orçamentos: (i) para o projeto original, (ii) para a simulação na qual a otimização foi realizada variando apenas as declividades dos trechos, (iii) para a simulação na qual a otimização foi realizada variando apenas os diâmetros dos trechos, e (iv) para a simulação na qual a otimização foi realizada variando simultaneamente as declividades e os diâmetros dos trechos. A Figura 11 apresenta os quatro orçamentos citados.

Figura 11 - Orçamentos do sistema de galerias com base nas otimizações



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 11, percebe-se que o maior orçamento foi o composto pelo projeto original (i) e o menor o composto pela otimização realizada variando simultaneamente as declividades e os diâmetros dos trechos (iv). Assim, como recomendação para futuros projetos na área de drenagem urbana, tem-se que quanto mais próximo dos valores de referência para y/D e velocidade de escoamento, mais próximo estará a rede dimensionada da sua capacidade máxima. Dessa forma, o sistema será mais eficiente e econômico. Ou seja, é importante que sempre se realize a otimização dos projetos de galerias. Para isso, percebe-se a importância de, nesse processo iterativo, se utilizar um modelo numérico, como o SWMM, o qual é capaz de solucionar, rapidamente, as equações de Saint-Venant e simular os resultados após cada variação dos diâmetros e declividades dos trechos.

4 CONCLUSÕES

As vazões no projeto original, calculadas via Método Racional, apresentaram valores menores que as obtidas no SWMM, o qual resolve as equações de Saint-Venant para o cálculo do escoamento nas galerias. Por conseguinte, o dimensionamento exposto pelo projeto se apresentou como não econômico, visto que, quando simulado no SWMM, utilizando dos mesmos diâmetros do projeto original, houve trechos nos quais a relação y/D e as velocidades foram elevadas. Desse modo, tem-se que os escoamentos nas galerias devem ser simulados utilizando-se o regime de escoamento não uniforme e deve-se repensar a utilização do Método Racional (regime uniforme) para esse fim. Assim, o dimensionamento se apresenta como mais seguro e próximo à realidade.

Além disso, a metodologia de otimização proposta através da variação simultânea nos valores das declividades e dos diâmetros dos trechos apresentou um orçamento reduzido quando comparado ao orçamento do projeto original. Sendo assim, é interessante o uso de metodologias para otimização do dimensionamento a fim de torná-lo mais eficaz e econômico, fazendo com que os valores de y/D e das velocidades de projeto se aproximem ao máximo dos valores de referência.

Por fim, é interessante pensar no uso de *softwares*, como o SWMM, capazes de simular o escoamento e auxiliar na otimização do dimensionamento de redes de drenagem, uma vez que confere benefícios técnicos e financeiros à execução. Além disso, é essencial a elaboração de uma normativa brasileira que conduza o dimensionamento, a fim de centralizar as diretrizes desse processo e de avançar no desenvolvimento da área em questão.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se que sejam desenvolvidos códigos computacionais para automatizar no SWMM a utilização das três metodologias de otimização de galerias propostas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarez, M.; Filho, G.; Nobre, M.; Nascimento, R.; Santos, W. 2020. Análise do Evento Hidrológico Extremo Ocorrido na Bacia do Rio Piraquara, em Realengo, Rio de Janeiro, RJ. p. 1–4. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/II END – Encontro nacional de desastres. <https://www.abrh.org.br/iiend/>

Bate&Sonda. Laudo de Sondagem. Contagem: Bate&Sonda, 2019.

Batista, J.; Boldrin, A. 2018. Avaliação do desempenho hidráulico de um sistema de drenagem de águas pluviais urbanas. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.23, n2, p.1-11. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018170663>

Bohnenberger, J.; Júnior, K.; Calijuri, M., 2019. Numerical modeling for the urban drainage gallery systems design. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (Online), v. 24. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180172>.

Carvalho, D.; Pimenta, I.; Costa, M.; Costa, J. 2018. Estudo Comparativo da Aplicação de Técnicas Simplificadas Baseadas no Método Racional com o Modelo SWMM em uma Área Urbana de 15 Hectares. Associação Brasileira de Recursos Hídricos/XII ENAU - Encontro nacional de águas urbanas. <https://www.abrh.org.br/xivsrhne>.

Ferreira, D.; Fernandes, C.; Gomes, J. 2017. Verification of Saint-Venant equations solution based on the lax diffusive method for flow routing in natural channels. RBRH (Online),v.22. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716104>

Google Maps. Área de estudo em minas gerais. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 6 de janeiro 2021.

Guimarães, R. 2009. Comparação entre duas metodologias de cálculo e propagação de vazões em coletores de redes de drenagem urbana: o método racional e equações de Saint-Venant. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Recuperado em 2021-02-12, em <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/3673>.

Ideal Consultoria Júnior. Projeto de Drenagem. 2017.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Pesquisa de Informações Básicas Municipais do ano de 2017. Disponível em:

<<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101610.pdf>>. Acesso em: 17 abril 2021.

Jansen, G.; Vieira, R.; Mattedi, M.; Pinheiro, A. 2021. Estruturação organizacional-institucional dos municípios na governança da gestão de risco de desastres em bacias hidrográficas. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 18, e1. <https://doi.org/10.21168/reg.v18e1>.

Júnior, M. 2018. Modelagem hidráulica hidrológica do escoamento superficial com a utilização do SWMM integrado ao SIG: o exemplo de Ilha Solteira – SP. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. Recuperado em 2020-09-18, em <http://hdl.handle.net/11449/153972>.

Lima, J.; Costa, M.; Costa, J. 2017. Uso do SWMM na modelagem hidrológica da área urbana de Sobral, Ceará, Brasil. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental/Congresso ABES Fenasan. <http://abes-dn.org.br/?cat=50>.

Oliveira, F.; Soares, A.; Pereira, T.; Formiga, K. 2016. Uso de modelo hidrodinâmico para determinação da vazão a partir de medições de nível. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 4, p. 707–718. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616007>.

Paulino, P. 2014. Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. Recuperado em 2020-08-24, em DOI: 10.11606/D.18.2014.tde-26012015-154125.

Peplau, G.; Neves, M. 2014. Análise de critérios para a determinação da vazão de restrição ao escoamento superficial urbano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* v. 19, n.4, p. 97-106. DOI: 10.21168/rbrh.v19n4.p97-106.

Porto, R.M, 2006. Hidráulica básica. EESC/USP, São Paulo, 540 p.

PBH. PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP). *Caderno de Encargos*. Capítulo 19 - Drenagem, 3ª edição. Belo Horizonte, 2017.

Silva, D. 2016. Análise da influência de microreservatórios em um loteamento e seus efeitos em escala de bacia. Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. Recuperado em 2021-04-02, em DOI: 10.11606/D.18.2017.tde-23032017-111325.

Simões, A.; Brito, R.; Schulz, H.; Porto, R. 2011. Aspectos numéricos e físicos de soluções das equações de saint-venant. 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia/3º Congresso de Engenharia de Moçambique. CLME'2011/IIICEM. DOI:10.13140/2.1.3672.1440.

Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento, 2019. SNIS - Diagnóstico do Serviço de Águas Pluviais. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-aguas-pluviais/diagnostico-do-servico-de-aguas-pluviais-2019>>. Acesso em: 12 mar. 2021.

Soares, M.; Fiori, C.; Silveira, C.; Kaviski, E. 2017. Eficiência do método *Curve Number* de retenção de águas pluviais. Mercator, v. 16, e16001. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2017.e16001>.

Tucci, C. 2002. Gerenciamento da drenagem urbana. In: RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre,RS Vol. 7, n. 1(2002 jan./mar.), p. 5-27. DOI: 10.21168/rbrh.v7n1.p5-27.

Tucci, C.; CHAGAS, M. Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais. REGA, Porto Alegre, v. 14, n. e12, p. 1-16, 2018.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. SWMM 5.0: user manual Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development, 2010. ROSSMAN, L.A. (Org). Tradução do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2012, 280p.

Wilken, P. 1978. Engenharia de drenagem superficial. São Paulo: CETESB 477p.