

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Thiago Alex Rathke**

**MEDIDAS DE CONTROLE PLUVIAL NO LOTE:  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS E TELHADOS VERDES**

Porto Alegre

julho 2012

**THIAGO ALEX RATHKE**

**MEDIDAS DE CONTROLE PLUVIAL NO LOTE:  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS E TELHADOS VERDES**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Juan Martín Bravo**

Porto Alegre  
julho 2012

**THIAGO ALEX RATHKE**

**MEDIDAS DE CONTROLE PLUVIAL NO LOTE:  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS E TELHADOS VERDES**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2012

Prof. Juan Martín Bravo  
Dr. em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela UFRGS  
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dieter Wartchow (UFRGS)**  
Doutor pela Universität Stuttgart

**Eng. Adalberto Meller (UFRGS)**  
Mestre pela Universidade Federal de Santa Maria

**Prof. Juan Martín Bravo (UFRGS)**  
Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a meus pais, Mario e Adria, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Juan Martín Bravo, orientador deste trabalho, por todos os conhecimentos transmitidos e pelo tempo dedicado a este trabalho.

Agradeço a Profa. Carin Maria Schmitt pelas críticas construtivas que serviram para a elaboração de um trabalho consistente.

Agradeço à minha família, pais e irmã.

Agradeço aos meus colegas e amigos pelo apoio e amizade.

A chave de todas as ciências é inegavelmente  
o ponto de interrogação.

*Honoré de Balzac*

## **RESUMO**

A ocorrência de enchentes e inundações nos cenários urbanos vem se tornando comum nos últimos anos, em decorrência da crescente impermeabilização das áreas, alavancada pelo crescimento das grandes cidades. Em função destes problemas, uma das soluções encontradas baseia-se na utilização de medidas de controle do escoamento que visam à redução das vazões de pico na rede de drenagem através da utilização de dispositivos que aumentem a taxa de infiltração das áreas ocupadas. Há uma forte tendência no que se refere ao controle da drenagem urbana para que estas medidas de controle sejam realizadas em nível de lote, de modo a não transferir o problema para as redes de micro ou macrodrenagem da cidade. Com o objetivo de aliar soluções que diminuam os impactos gerados pela urbanização e que promovam o crescimento sustentável das cidades, de forma a reduzir a frequência de alagamentos, este trabalho se propõe a dissertar sobre dois dispositivos de controle pluvial no lote: os telhados verdes e os pavimentos permeáveis. Uma análise da eficiência individual e conjunta desses dispositivos, em função da redução da vazão de pico ou do volume escoado, é apresentada, através de gráficos comparativos das vazões geradas para um cenário onde o lote apresenta um elevado grau de impermeabilização, para o cenário de implementação de cada um dos dispositivos de controle isoladamente e para um cenário no qual é considerada a implementação dos dois dispositivos e sua correspondente interação. Para isso, foram estudadas as características do regime hidrológico local, por meio da identificação de um lote, na cidade de Porto Alegre, através da análise de imagens de satélite e definição e caracterização da composição de sua superfície. O evento precipitação foi criado a partir da equação IDF (Intensidade-Duração-Frequência) para essa Cidade fornecida no Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre e a partir disto foi realizado o processo de transformação da chuva em vazão de forma a permitir a comparação dos escoamentos superficiais resultantes nos diferentes cenários simulados. Com o desenvolvimento do trabalho, os resultados esperados foram obtidos, o efeito sobre o escoamento no sistema urbano aumenta à medida que os dispositivos de controle pluvial são aplicados. Para as condições ideais de aplicação, os volumes escoados superficialmente foram reduzidos em até 14% e a vazão de pico foi reduzida para 10% da inicial observada na área estudada.

Palavras-chave: Drenagem Urbana. Pavimentos Permeáveis. Telhados Verdes.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Etapas do trabalho de diplomação .....	16
Figura 2 – Etapas do ciclo hidrológico .....	19
Figura 3 – Processos que ocorrem com a urbanização .....	23
Figura 4 – Relação entre área impermeável e densidade populacional .....	25
Figura 5 – Tendência da ocupação e impacto .....	26
Figura 6 – Impacto da urbanização no hidrograma .....	28
Figura 7 – Curva IDF para a cidade de Porto Alegre .....	30
Figura 8 – Forma do hidrograma unitário sintético triangular do SCS .....	38
Figura 9 – Exemplo de convolução de hidrogramas unitários .....	39
Figura 10 – Tipos de pavimentos permeáveis .....	42
Figura 11 – Exemplos de diferentes tipos de pavimentos com reservatório estrutural ....	42
Figura 12 – Representação esquemática de alguns tipos de pavimentos .....	44
Figura 13 – Comparação do escoamento entre um telhado verde com uma cobertura tradicional .....	47
Figura 14 – Tipos de coberturas com telhados verdes .....	48
Figura 15 – Fluxograma detalhado do trabalho .....	51
Figura 16 – Localização da área estudada no município de Porto Alegre .....	53
Figura 17 – Composição da área do Shopping Bourbon Country .....	54
Figura 18 – Composição da área do Shopping Iguatemi Porto Alegre .....	55
Figura 19 – Rede de macrodrenagem do Arroio Areia .....	56
Figura 20 – Chuva de projeto reordenada pelo Método dos Blocos Alternados .....	59
Figura 21 – Vazão de pico para pavimento permeável CN 75 .....	67
Figura 22 – Vazão de pico para pavimento permeável CN 90 .....	67
Figura 23 – Vazão de pico para interação dos dispositivos e CN 75 .....	68
Figura 24 – Vazão de pico para interação dos dispositivos e CN 90 .....	68
Figura 25 – Volume escoado para pavimento permeável .....	69
Figura 26 – Volume escoado para telhado verde .....	70
Figura 27 – Volume escoado para a interação dos dispositivos .....	70
Figura 28 – Coeficiente de escoamento para pavimento permeável .....	71
Figura 29 – Coeficiente de escoamento para telhado verde .....	71
Figura 30 – Coeficiente de escoamento para a interação dos dispositivos .....	72
Figura 31 – Tempo de resposta para a interação dos dispositivos .....	73

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Classificação hidrológica dos solos pelo método SCS .....	33
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de escoamento de acordo com o tipo de ocupação .....	22
Tabela 2 – Crescimento populacional e parcela de população urbana .....	25
Tabela 3 – Tempo de retorno para sistemas urbanos .....	31
Tabela 4 – Número de escoamento para regiões urbanas, suburbanas e agrícolas .....	34
Tabela 5 – Número de escoamento para regiões rurais .....	35
Tabela 6 – Conversão do coeficiente CN para as diferentes condições de umidade .....	36
Tabela 6 – Coeficientes de escoamento de acordo com o tipo de ocupação .....	38
Tabela 7 – Coeficiente de escoamento de acordo com superfícies de revestimento .....	44
Tabela 8 – Resultado das chuvas nas superfícies simuladas .....	45
Tabela 9 – Valores de coeficiente de escoamento em relação à quantidade de chuva .....	49
Tabela 10 – Valores de coeficiente de escoamento em relação à espessura do substrato .....	50
Tabela 11 – Quantificação e percentual da composição das áreas .....	55
Tabela 12 – Chuva de projeto .....	58
Tabela 13 – Valores de CN em função da condição do telhado verde .....	59
Tabela 14 – Valores de CN em função da condição do pavimento permeável .....	60
Tabela 15 – Valor de CN para a ocupação inicial .....	61
Tabela 16 – Área e CN ponderado para a situação inicial .....	61
Tabela 17 – Área e CN ponderado para a Situação 1 .....	62
Tabela 18 – Área e CN ponderado para a Situação 2 .....	63
Tabela 19 – Área e CN ponderado para a Situação 3 .....	64
Tabela 20 – Resumo dos resultados obtidos para pavimento permeável .....	74
Tabela 21 – Resumo dos resultados obtidos para telhado verde .....	74
Tabela 22 – Resumo dos resultados obtidos para a interação dos dispositivos .....	75

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA .....</b>	<b>14</b>
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	14
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	14
<b>2.2.1 Objetivo Principal .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2 Objetivos Secundários .....</b>	<b>14</b>
2.3 HIPÓTESE .....	15
2.4 PRESSUPOSTO .....	15
2.5 PREMISSA .....	15
2.6 DELIMITAÇÕES .....	15
2.7 LIMITAÇÕES .....	15
2.8 DELINEAMENTO .....	16
<b>3 ÁGUAS URBANAS: ASPECTOS GERAIS E DEFINIÇÕES .....</b>	<b>18</b>
3.1 CICLO HIDROLÓGICO .....	18
3.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	20
3.3 DRENAGEM URBANA .....	23
<b>3.3.1 Crescimento populacional .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.2 Ocupação do solo .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.3 Planejamento urbano .....</b>	<b>26</b>
3.4 EVENTOS DE PROJETO .....	29
<b>4 DISPOSITIVOS DE CONTROLE PLUVIAL .....</b>	<b>40</b>
4.1 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS .....	40
<b>4.1.1 Classificação .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.2 Coeficientes de escoamento .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.3 Limitações .....</b>	<b>46</b>
4.2 TELHADOS VERDES .....	46
<b>4.2.1 Classificação .....</b>	<b>48</b>
<b>4.2.2 Coeficientes de escoamento .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.3 Limitações .....</b>	<b>50</b>
<b>5 CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM .....</b>	<b>51</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS .....	52

<b>5.1.1</b>	<b>Descrição da área estudada .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1.2</b>	<b>Definição e quantificação das áreas .....</b>	<b>53</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Hietograma de projeto .....</b>	<b>57</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Valores do coeficiente CN .....</b>	<b>58</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Área de implantação dos dispositivos .....</b>	<b>60</b>
<b>5.2</b>	<b>CENÁRIOS HIPOTÉTICOS ESTUDADOS .....</b>	<b>60</b>
<b>5.3</b>	<b>MODELAGEM CHUVA-VAZÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>66</b>
<b>6.1</b>	<b>VAZÃO DE PICO .....</b>	<b>66</b>
<b>6.2</b>	<b>VOLUME ESCOADO .....</b>	<b>69</b>
<b>6.3</b>	<b>COEFICIENTE DE ESCOAMENTO .....</b>	<b>71</b>
<b>6.4</b>	<b>TEMPO DE RESPOSTA.....</b>	<b>72</b>
<b>6.5</b>	<b>RESUMO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>76</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICE A – GRÁFICOS COMPARATIVOS DAS VAZÕES DE PICO .....</b>	<b>79</b>
	<b>APÊNDICE B – GRÁFICOS COMPARATIVOS DOS TEMPOS DE RESPOSTA .....</b>	<b>86</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O avanço econômico do País, principalmente na última década, gerou um aumento na quantidade de edificações e a expansão dos grandes centros urbanos é comum ao longo de todo o Território Nacional. Grandes áreas, antes predominantemente ocupadas por instalações rurais estão se transformando em centros residenciais, devido à crescente construção de loteamentos e condomínios. Os principais impactos decorrentes desta urbanização estão diretamente ligados à forma de ocupação do solo e ao aumento das superfícies impermeáveis, causando um impacto sobre o ciclo hidrológico através do aumento das vazões de pico e dos volumes escoados durante os eventos de chuva, trazendo como consequência a superação da capacidade do sistema de drenagem pluvial das cidades. Isso tem tornado mais frequentes as ocorrências de inundações e enchentes que trazem prejuízos sociais e financeiros à população.

No que se refere à drenagem urbana, o impacto da urbanização pode ainda ser transferido para jusante, ou seja, quem sofre as consequências pode não ser necessariamente quem produz o impacto. Por isso, a tendência atual é a busca por soluções que visam à manutenção das vazões geradas antes da urbanização, atuando na fonte de geração do escoamento. Segundo Porto Alegre (2005, p. 10), alguns princípios devem ser considerados para o bom desenvolvimento de um programa de drenagem urbana. Dentre eles, há o que prescreve que cada usuário urbano não deve ampliar a cheia natural, ou seja, o escoamento durante os eventos chuvosos não pode ser ampliado pela ocupação da bacia hidrográfica, seja em um simples loteamento, seja nas obras de macrodrenagem existentes no ambiente urbano. Dentre os diferentes dispositivos amplamente utilizados para controle de escoamento no lote, existem alternativas de baixo impacto onde se encontram os pavimentos permeáveis e os telhados verdes. Estes tipos de dispositivos de controle são capazes de reduzir os volumes de escoamento superficial, tempo de resposta das bacias e a vazão de pico para níveis iguais ou até inferiores aos observados antes da urbanização, dependendo da magnitude do evento chuvoso. Cabe salientar que para haver um completo funcionamento destas medidas que buscam a manutenção do sistema de drenagem urbana, construção e conservação destes deverá ser de responsabilidade daqueles que produzem o aumento do escoamento superficial.

Tendo em vista a busca por soluções que visam à diminuição das vazões de pico e que desta forma não venham a sobrecarregar o sistema de drenagem urbano, este trabalho tem como objetivo o estudo de medidas de controle pluvial no lote e a utilização de dispositivos para este fim. Este trabalho avalia a aplicabilidade destes métodos construtivos para uma determinada área já existente, e então apresenta um estudo comparativo das vazões geradas, antes e depois de sua aplicação, verificando a sua eficiência.

A descrição do método, questão e objetivos da pesquisa podem ser vistos no segundo capítulo. Além destes, são apresentadas a hipótese, pressuposto, premissa, delimitações, limitações e o delineamento do trabalho.

O terceiro capítulo apresenta conceitos necessários para o entendimento de como os processos hidrológicos agem sobre as bacias hidrográficas e como estes são afetados pela urbanização, principalmente no aspecto da drenagem urbana. São apresentadas as principais características da bacia e que afetam o escoamento superficial, bem como a definição de eventos de projeto.

A descrição e classificação dos dispositivos de controle pluvial quanto à funcionalidade e a composição são exibidos no quarto capítulo, nele também podem ser visualizados valores de coeficiente de escoamento superficial obtidos em pesquisas desenvolvidas para este fim e as limitações que são impostas a utilização destes.

Após apresentados os principais componentes para o entendimento do trabalho através da pesquisa bibliográfica apresentada nos capítulos anteriores, o capítulo 5 apresenta os parâmetros e características da bacia a serem levados em conta no processo de transformação da chuva em escoamento superficial. Neste capítulo também são apresentadas diferentes variáveis a serem avaliadas a fim de verificar a sua influência na geração de escoamento juntamente com as combinações de utilização dos dispositivos de controle de escoamento. Três cenários foram simulados nas avaliações: cenário atual; cenário com a implantação de uma medida de controle; cenário com a implantação de uma combinação de medidas de controle.

No capítulo 6 são realizadas as análises dos resultados obtidos através da simulação dos diferentes cenários. A comparação destes resultados é apresentada em gráficos e tabelas, de forma a facilitar a compreensão por parte do leitor.

No último capítulo são realizadas as considerações finais e conclusões obtidas a respeito do trabalho desenvolvido.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: qual o efeito da utilização de dispositivos de controle pluvial no lote, quanto à redução da vazão de pico e dos volumes escoados, originalmente lançados à rede pública de drenagem, para uma determinada área urbana?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal do trabalho é a avaliação da utilização de dispositivos de controle pluvial, como telhados verdes e pavimentos permeáveis, para a diminuição das vazões de pico e dos volumes escoados a jusante do mesmo, em uma determinada área urbana, sobre os aspectos quantitativos do escoamento das águas precipitadas.

#### **2.2.2 Objetivos secundários**

Os objetivos secundários do trabalho são a descrição das características e definições, detalhando materiais empregados e respectivos valores de coeficientes de escoamento superficial do:

- a) pavimento permeável;
- b) telhado verde.

## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que a utilização de dispositivos de controle pluvial no lote, como pavimentos permeáveis e telhados verdes, utilizados simultaneamente, são capazes de reduzir as vazões de pico e volumes escoados aos níveis da pré-urbanização.

## 2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as curvas IDF (Intensidade-Duração-Frequência) obtidas a partir de registros históricos de precipitação de pluviógrafos fornecidas no Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre são representativas das condições futuras da ocorrência de eventos de precipitação.

## 2.5 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que o controle do escoamento superficial deve ser feito na fonte geradora para que suas consequências não sejam transferidas a jusante.

## 2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de uma área urbanizada na cidade de Porto Alegre.

## 2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

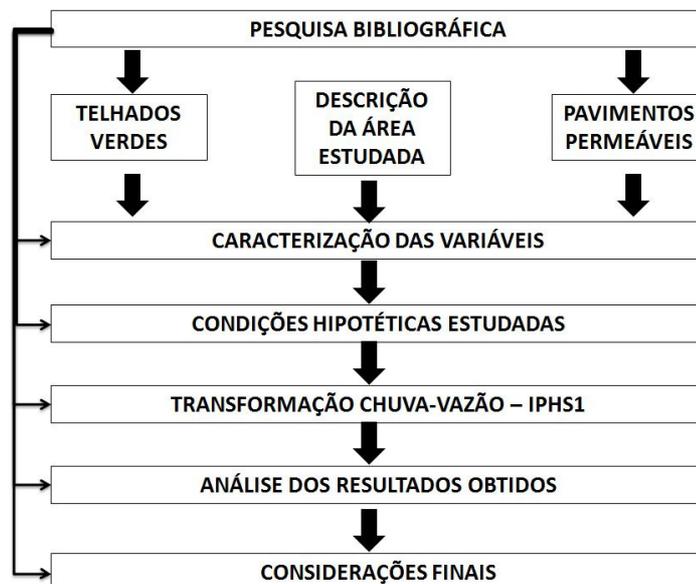
- a) o uso de equações IDF de Porto Alegre;
- b) o uso de piso e telhado para diminuir vazões;
- c) área com alta taxa de impermeabilização e cerca de 75% do total da área passível da utilização dos dispositivos;
- d) a utilização do programa IPHS1 para a transformação de chuva em vazão;
- e) a utilização de planilha eletrônica para a apresentação de tabelas e gráficos representativos aos resultados do trabalho.

## 2.8 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) descrição da área estudada;
- c) condições hipotéticas estudadas;
- d) transformação de chuva em vazão – IPHS1;
- e) aplicação do modelo de cálculo;
- f) análise dos resultados obtidos;
- g) considerações finais.

Figura 1 – Etapas do trabalho de diplomação



(fonte: elaborado pelo autor)

Após a definição do tema, iniciou-se a **pesquisa bibliográfica**. Nesta etapa foram obtidas informações sobre:

- a) ciclo hidrológico;
- b) drenagem urbana;
- c) dispositivos de controle pluvial na fonte;

- d) telhados verdes;
- e) pavimentos permeáveis;
- f) pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial;
- g) impactos do dimensionamento de redes de drenagem.

Posteriormente realizou-se a **definição e caracterização das variáveis** relacionadas ao pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte aplicadas a um lote: definição da série pluviométrica a ser utilizada, relação entre áreas permeáveis e impermeáveis, comparação entre volume de água precipitado e escoado, assim como o desenvolvimento de um modelo chuva-vazão.

Na etapa seguinte foram **definidos cenários hipotéticos** a serem estudados e como esses dispositivos podem ser combinados, foram feitos estudos primeiramente para a utilização de pavimentos permeáveis com diferentes características, em seguida será feita o mesmo para os telhados verdes, e por fim, será criado um cenário ideal, com a iteração das duas soluções prévias.

Com as variáveis para cada tipo de dispositivo já caracterizadas, a área de estudo definida e com a composição das combinações pode ser feito processo de **transformação de chuva em vazão** para cada um dos cenários analisados, com a utilização de um modelo matemático.

**Análise dos resultados obtidos** a partir da aplicação do modelo matemático na área de estudo e avaliação da interação dos dispositivos de controle pluvial no lote, gerando assim gráficos que possam relacionar o percentual da área revestida por pavimentos permeáveis em relação à área total, comparando diferentes variáveis hidrológicas, como as vazões de pico e o volume escoado, obtidas conforme a variação deste percentual.

E, por último, foram feitas as **considerações finais** sobre os resultados obtidos com a realização deste trabalho.

### 3 ÁGUAS URBANAS: ASPECTOS GERAIS E DEFINIÇÕES

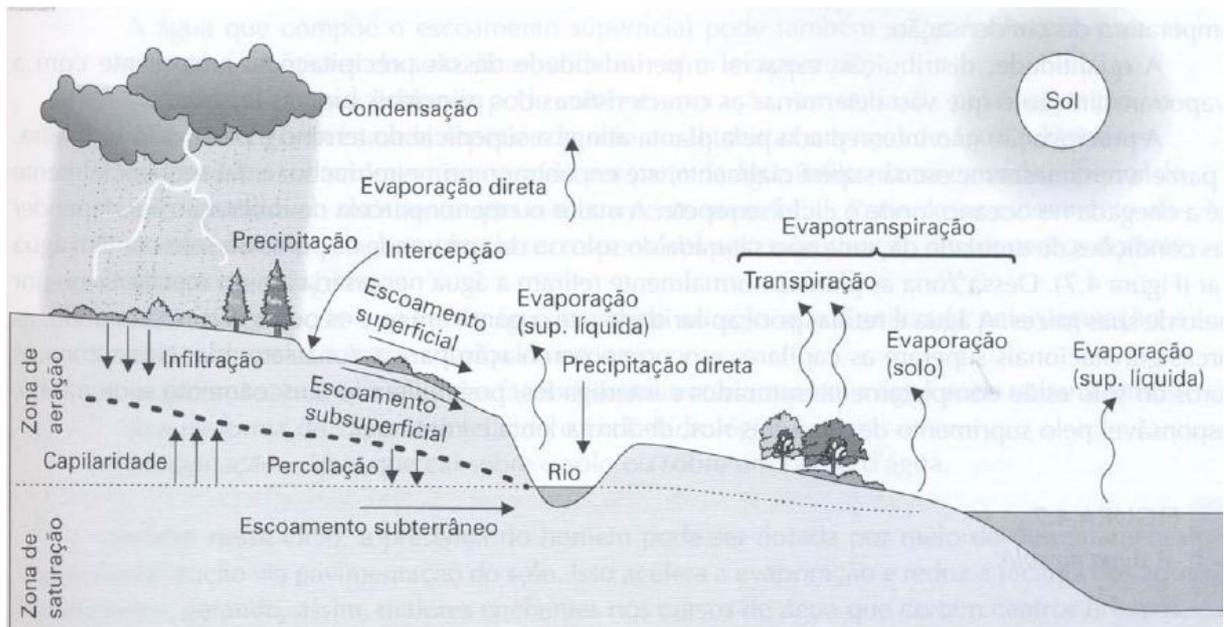
O acelerado avanço econômico do Brasil nos últimos anos, aliado a programas governamentais criados para facilitar o acesso à primeira moradia, vem trazendo um crescimento que até então era inimaginável às cidades brasileiras. A urbanização crescente, a diminuição das áreas verdes, o aumento exponencial da população são intensos nos últimos anos. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010), no Brasil cerca de 84% da população vive em áreas urbanas. Essa transformação do ambiente natural em urbanizado provoca o aumento das áreas impermeáveis, que por sua vez, aumenta o escoamento superficial das águas e a vazão de pico que vem a sobrecarregar os sistemas de drenagem urbana.

Os efeitos da urbanização afetam diretamente os processos hidrológicos que atuam na bacia. Castro et al. (2008) classifica estes processos como acontecimentos ou fenômenos físicos que ocorrem na superfície terrestre em decorrência das precipitações à medida que estas águas circulam pela crosta terrestre. Para a compreensão do andamento desses fenômenos e de sua influência nas atividades humanas é necessário um entendimento do conceito de ciclo hidrológico e de bacia hidrográfica. Desta forma, esses são detalhados nos próximos itens.

#### 3.1 CICLO HIDROLÓGICO

Segundo Castro et al. (2008), a circulação de água na natureza pode ser encarada conceitualmente com um ciclo contínuo de entradas, saídas e armazenamentos interligados. Essa movimentação de água pode ser imaginada como uma troca de volumes hídricos entre dois grandes reservatórios, um terrestre e outro aéreo (atmosfera) que fazem a transferência de água entre si, através de dois importantes processos hidrológicos, que são a precipitação e a evaporação. Na parte terrestre, o fenômeno de formação e propagação do escoamento superficial e subterrâneo é de grande importância na hidrologia. A entrada principal é a precipitação e a saída pode ocorrer tanto na forma de evaporação como na forma de escoamento ou infiltração. Este processo pode ser visualizado na figura 2.

Figura 2 – Etapas do ciclo hidrológico



(fonte: BRAGA, 2005, p. 35)

Tucci (2007, p. 8) acrescenta que:

O ciclo hidrológico é impulsionado por energia eletromagnética proveniente do sol e pela energia de caráter gravitacional do sistema solar. O sol fornece energia para a evaporação da água e o campo gravitacional terrestre, conjuntamente com a força de Coriolis, condicionam o movimento dos ventos (responsáveis pelo transporte atmosférico horizontal); as influências gravitacionais do sol e da lua alteram o equilíbrio das massas de água e as variações na emissão de energia pelo sol (manchas solares) e nos raios cósmicos e incidem sobre a estabilidade atmosférica, afetando, por sua vez, a distribuição da água na superfície terrestre.

Buffon (2010) salienta que a chuva é a etapa do ciclo hidrológico mais perceptível pela sociedade no meio urbano, uma vez que, quando ocorre sobre superfícies impermeáveis urbanas que não foram dimensionadas para um determinado evento, é impedida de se infiltrar ao solo, gera aumento no volume de escoamento superficial e por consequência alagamentos e enchentes no caso que a capacidade do sistema se veja excedida.

Para melhorar a compreensão das inter-relações das variáveis que descrevem os processos hidrológicos, utilizam-se diagramas adequados para cada caso. No caso das chuvas, a quantidade gerada pelo fenômeno em uma determinada área pode ser medida com facilidade através da utilização de pluviômetros analógicos ou digitais, estes registram valores referentes à escala de um dia, de forma a se obter uma série histórica de volumes precipitados. Estes dados históricos de séries pluviométricas diárias para diversas regiões brasileiras podem ser

facilmente encontradas com o recurso da *internet*, através de sítios eletrônicos de entidades e associações com estes fins.

Para o registro contínuo da intensidade das precipitações são utilizados os pluviógrafos. Este aparelho mede a variação da altura de chuva com o tempo e são ajustados numa escala temporal contínua. Através destes registros podem ser determinadas as curvas e equações IDF para este determinado local. Estas curvas recebem este nome porque relacionam intensidade, duração e frequência de chuvas.

### 3.2 BACIAS HIDROGRÁFICAS

A bacia hidrográfica define-se como a superfície drenada por um curso d'água e seus afluentes a montante de uma determinada seção. Esta área é delimitada por uma linha que passa pelo cume das elevações periféricas (divisor de águas) e que corta o eixo do rio somente uma vez na parte da saída (exutório da bacia), que é o ponto mais baixo da linha cumeada. As características da bacia incidem diretamente sobre o tipo de onda de cheia gerada, sendo de primordial importância o conhecimento dessas características para que possa ser feita a representação do processo de transformação de chuva em vazão. Dentro dessa ótica os parâmetros mais importantes são o **tempo de concentração**, **coeficiente de escoamento** e **área de drenagem** (CASTRO et al., 2008).

Tucci (2007, p. 394) define **tempo de concentração** como “[...] o tempo necessário para a água precipitada no ponto mais distante da bacia deslocar-se até o exutório da bacia. Esse tempo é definido também entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma.”.

Segundo Castro et al. (2008), pode-se determinar o tempo de deslocamento para uma série de locais na região em questão, gerando um campo de tempos de deslocamento. Para cada bacia existe apenas um tempo de concentração, no entanto a água que escoar de cada ponto da bacia leva um tempo para chegar à foz e a partir desta série de tempos distintos para cada ponto é possível interpolar e traçar uma rede de isolinhas de igual duração, que são denominadas de isócronas, e adotando o maior valor obtido como tempo de concentração para a região que está sendo analisada.

Tucci (2007) salienta que para o caso de bacias urbanas, incluindo espaços com arruamentos pavimentados e com sarjetas ao longo de passeios, a expressão recomendada para se calcular o tempo de concentração é com a utilização da fórmula 1, desenvolvida por Schaake:

$$tc = \frac{4,968 \times L^{0,24}}{S^{0,16} \times Aimp^{0,26}} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

tc = tempo de concentração (min);

L = comprimento do talvegue principal (km);

S = declive médio da bacia em estudo (m/m);

Aimp = percentagem de áreas impermeáveis da bacia em estudo.

A **área de drenagem** de uma bacia hidrográfica é a superfície em que todas as precipitações que ocorrem sobre essa região contribuem para o mesmo leito ou o mesmo sentido de escoamento, ou seja, os escoamentos convergem para o mesmo ponto de saída da região, o exutório da bacia. Por fim, pode-se dizer que se trata da área onde as consequências das precipitações vão ser estudadas ou investigadas (CASTRO et al., 2008).

O **coeficiente de escoamento** representa a parcela da precipitação que gera escoamento e varia à medida que a bacia se urbaniza e com a magnitude do evento de precipitação, sendo definido como a relação entre a quantidade de água total escoada numa determinada seção e a quantidade total de água precipitada na bacia hidrográfica contribuinte, conforme fórmula 2, este valor deve introduzir a influência de diversos fatores da qual depende o escoamento (TUCCI, 2000):

$$c = \frac{Pesc}{Ptot} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

c = coeficiente de escoamento superficial (adimensional);

Pesc = quantidade de chuva que esco superficialmente (mm);

Ptot = quantidade total precipitada na bacia (mm).

O PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005) apresenta os valores de coeficiente de escoamento que variam em função com o tipo de ocupação, tabela 1.

Tabela 1 – Coeficientes de escoamento de acordo com o tipo de ocupação

Descrição da área	C
<i>Área Comercial/Edificação muito densa:</i>	
Partes centrais, densamente construídas, em cidade com ruas e calçadas pavimentadas	0,70 - 0,95
<i>Área Comercial/Edificação não muito densa:</i>	
Partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas	0,60 - 0,70
<i>Área Residencial:</i>	
residências isoladas; com muita superfície livre	0,35 - 0,50
unidades múltiplas (separadas); partes residenciais com ruas macadamizadas ou pavimentadas	0,50 - 0,60
unidades múltiplas (conjugadas)	0,60 - 0,75
lotes com > 2.000 m <sup>2</sup>	0,30 - 0,45
áreas com apartamentos	0,50 - 0,70
<i>Área industrial:</i>	
indústrias leves	0,50 - 0,80
indústrias pesadas	0,60 - 0,90
<i>Outros:</i>	
Matas, parques e campos de esporte, partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas e parques ajardinados	0,05 - 0,20
parques, cemitérios; subúrbio com pequena densidade de construção	0,10 - 0,25
<i>Playgrounds</i>	0,20 - 0,35
pátios ferroviários	0,20 - 0,40
áreas sem melhoramentos	0,10 - 0,30

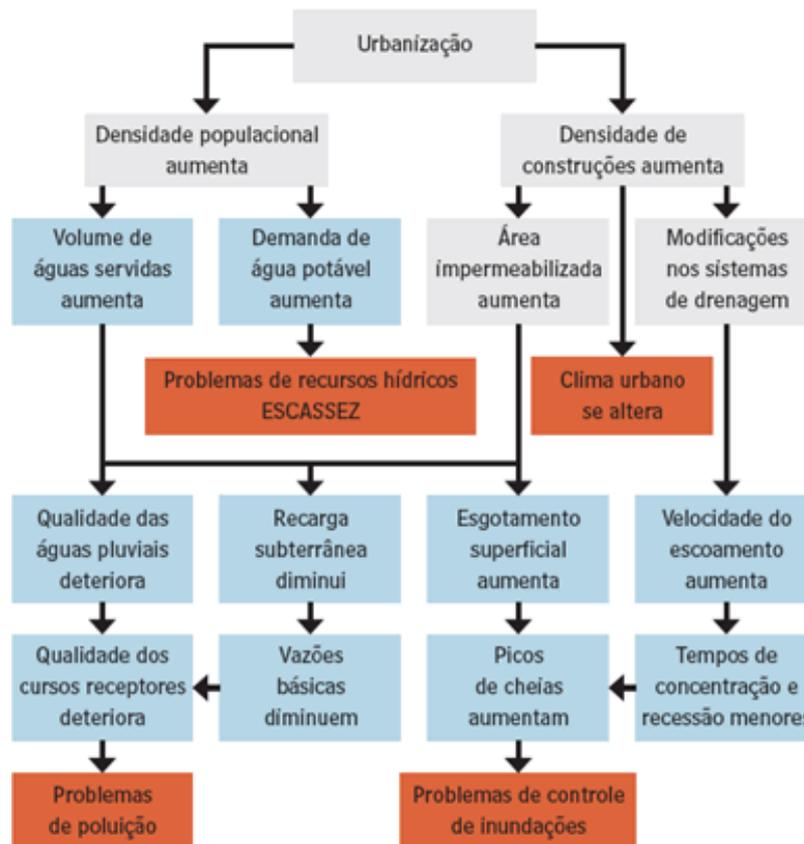
(fonte: PORTO ALEGRE, 2005, p. 86)

Castro et al. (2008) salientam que o coeficiente de escoamento varia em decorrência do tipo de solo predominante na bacia e da sua capacidade de infiltração. Solos pouco permeáveis, como os argilosos, produzem altos valores de escoamento superficial e as bacias são de alto potencial para a geração de cheias. Por outro lado, solos arenosos possuem grande capacidade de infiltração e baixas possibilidades de gerar cheias. O tipo de cobertura vegetal da bacia afeta também o coeficiente de escoamento, mas de forma menos acentuada.

### 3.3 DRENAGEM URBANA

Os impactos da urbanização sobre o sistema de drenagem das cidades estão fundamentalmente relacionados a três processos principais: crescimento populacional, ocupação do solo e deficiente planejamento urbano, que vem a alterar o regime hídrico de uma bacia, como pode ser visualizado na figura 3.

Figura 3 – Processos que ocorrem com a urbanização



(fonte: adaptado de HALL, 1984, p. 178, tradução nossa)

Para que os efeitos da urbanização não venham a sobrecarregar o sistema de drenagem urbano das cidades, toda ocupação, de qualquer área da cidade, deve obedecer às diretrizes pré-estabelecidas no Plano Diretor de Drenagem Urbana (PORTO ALEGRE, 2005). Este tem por finalidade estabelecer regras básicas para a ocupação e organização do espaço urbano da cidade, apontando soluções de planejamento em drenagem urbana que evitem e/ou minimizem o aumento das enchentes e os impactos sobre a qualidade da água.

As soluções apresentadas podem ser através de medidas estruturais e não-estruturais, que dificilmente estão dissociadas e são definidas no PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 10) como:

As medidas estruturais envolvem grande quantidade de recursos e resolvem somente problemas específicos e localizados. Isso não significa que esse tipo de medida seja totalmente descartável. A política de controle de inundações, certamente, poderá chegar à soluções estruturais para alguns locais, mas dentro da visão de conjunto de toda a bacia, onde estas sejam racionalmente integradas com outras medidas preventivas (não-estruturais) e compatibilizadas com o esperado desenvolvimento urbano.

As medidas incluídas no PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005) também podem ser classificadas quanta a escala ou área de abrangência:

- a) fonte: definido pelo escoamento que ocorre no lote, condomínio ou empreendimento individualizado, estacionamentos, área comercial, parques e passeios;
- b) microdrenagem: definida pelo sistema de condutos pluviais ou canais em um loteamento ou de rede primária urbana. É projetado para atender a drenagem de precipitações com risco moderado;
- c) macrodrenagem: envolve um conjunto de coletores de diferentes sistemas de microdrenagem. Devem ser projetados com capacidade superior ao de microdrenagem, com riscos de acordo com os prejuízos humanos e materiais potenciais.

### **3.3.1 Crescimento populacional**

O crescimento da população urbana vem se tornando comum nas cidades brasileiras nas últimas décadas e isto ocasiona no surgimento das grandes metrópoles, principalmente nas capitais de cada estado brasileiro, como pode ser visto na tabela 2. A tendência atual é de que os núcleos das metrópoles venham a ter um crescimento populacional pequeno, enquanto suas periferias apresentam valores altos, gerando grandes zonas de expansão urbana. Esse fenômeno causa uma série de problemas sobre a infraestrutura dos recursos hídricos urbanos, principalmente no que diz respeito à expansão irregular das periferias, com pouca obediência a regulamentação urbana relativa ao plano diretor e normas específicas de loteamentos, dificultando assim a tomada de ações não estruturais de controle ambiental urbano por parte do governo (TUCCI, 2002).

Tabela 2 – Crescimento populacional e parcela de população urbana

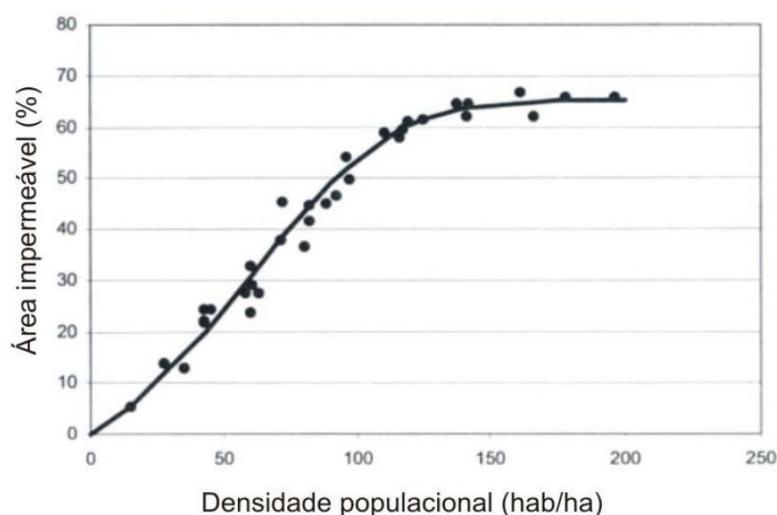
ANO	POPULAÇÃO (milhões de habitantes)	PARCELA DA POPULAÇÃO URBANA (%)
1970	93,1	55,9
1980	118,0	68,2
1991	146,8	75,6
1996	157,1	78,4
2000	169,0	81,1
2010	190,8	84,4

(fonte: adaptado de TUCCI<sup>1</sup>, 2002, p. 5)

### 3.3.2 Ocupação do solo

De acordo com o PDDrU de Porto Alegre (2005), há também uma forte relação do crescimento demográfico com a taxa de impermeabilização do solo em questão, conforme é apresentado na figura 4, que apresenta uma estimativa de área impermeável da bacia em função da densidade populacional.

Figura 4 – Relação entre área impermeável e densidade populacional



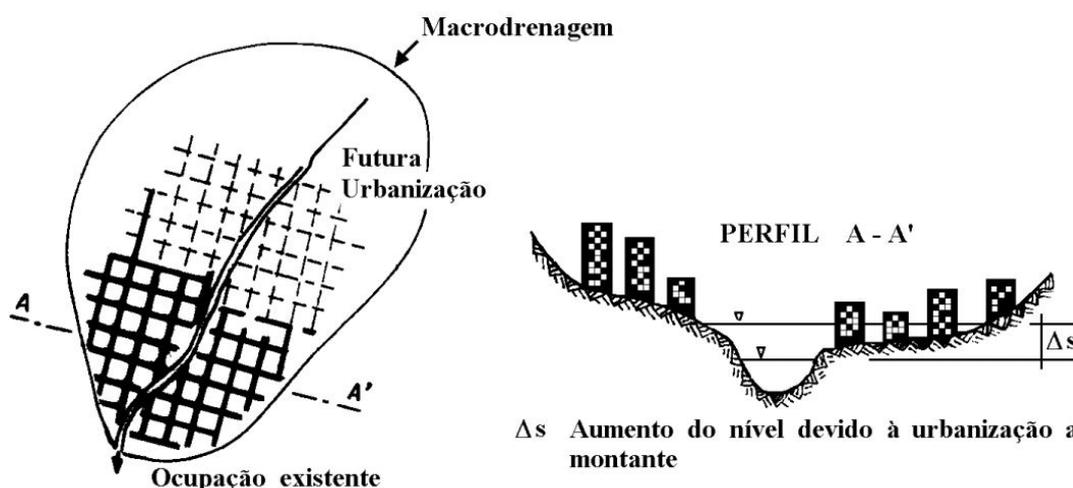
(fonte: PORTO ALEGRE, 2002, p. 166)

No que se refere à forma de ocupação das cidades, Tucci (1995, p. 22) salienta que:

<sup>1</sup> Os dados de 2010 foram coletados junto ao INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA para atualização.

A tendência da urbanização é de ocorrer no sentido de jusante para montante, na macrodrenagem urbana, devido às características de relevo. [...] Normalmente, o impacto do aumento da vazão máxima sobre o restante da bacia não é avaliado pelo projetista ou exigido pelo município. A combinação do impacto dos diferentes loteamentos produz aumento da ocorrência de enchentes à jusante. Esse processo ocorre através da sobrecarga da drenagem secundária (condutos) sobre a macrodrenagem (riachos e canais) que atravessa a cidade. As áreas mais afetadas, devido à construção das novas habitações a montante, são as mais antigas, localizadas a jusante (figura 5).

Figura 5 – Tendência da ocupação e impacto



(fonte: TUCCI, 1995, p. 23)

A impermeabilização das áreas superficiais, principalmente na forma inadequada, é um dos fatores que mais gera impacto ambiental, pois esta provoca a alteração das características naturais do solo, aumentando a ocorrência de alagamentos. Segundo Tucci (1995) há uma forte relação entre a forma de ocupação das áreas de uma bacia e os recursos hídricos, e é de responsabilidade dos gestores municipais determinarem os critérios e normas sobre a alteração de quantidade e qualidade da água pluvial, principalmente no que se refere ao aumento do volume escoado, redução de recarga de aquíferos e redução da evapotranspiração.

### 3.3.3 Planejamento urbano

A urbanização acelerada, sem o desenvolvimento de um planejamento estruturado que venha a mitigar as suas consequências, pode gerar grandes problemas. De acordo com Tucci (1995, p. 15), “Os efeitos desse processo se fazem sentir sobre todo o aparelho urbano relativo aos

recursos hídricos: abastecimento de água, transporte e tratamento de esgotos cloacais e drenagem pluvial.”.

Tucci (1995, p. 17-19) salienta também que:

Com o desenvolvimento urbano, ocorre a impermeabilização do solo através de telhados, ruas, calçadas e pátios, entre outros. Dessa forma, a parcela de água que infiltrava passa a escoar pelos condutos, aumentando o escoamento superficial. O volume que escoava lentamente pela superfície do solo e ficava retido pelas plantas, com a urbanização, passa a escoar no canal, exigindo maior capacidade de escoamento das seções. [...] Os efeitos principais da urbanização são o aumento da vazão máxima, a antecipação do pico e o aumento do volume do escoamento superficial.

É importante entender as consequências da urbanização sobre os sistemas de drenagem da cidade, principalmente no que se refere à tomada de decisões e fiscalização por parte do município da ocupação dos lotes, no sentido de que a forma de ocupação do mesmo não venha a aumentar os efeitos de cheia, mitigando os impactos da urbanização.

As enchentes causadas pela urbanização, geralmente ocorrem em bacias de pequeno porte. De acordo com Tucci (1995, p. 22-23):

As consequências dessa falta de planejamento e regulamentação são sentidas em praticamente, todas as cidades de médio e grande porte do país. Depois que o espaço está todo ocupado, as soluções disponíveis são extremamente caras, tais como canalizações, diques com bombeamentos, reversões e barragens, entre outras. O poder público passa a investir uma parte significativa do seu orçamento para proteger uma parcela da cidade que sofre devido à imprevidência da ocupação do solo. Esses fundos provêm de impostos de toda a população do município, estado ou da federação. Portanto, cabe, muitas vezes, questionar quem deve pagar e se deveria ser permitida essa ocupação.

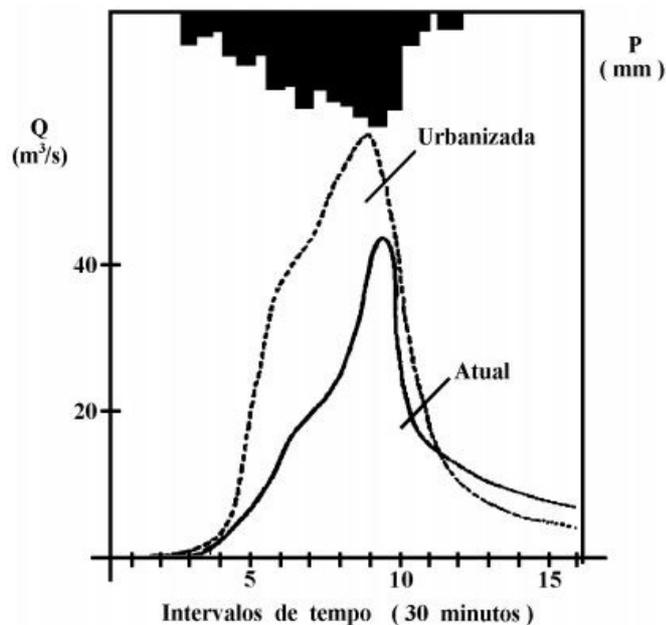
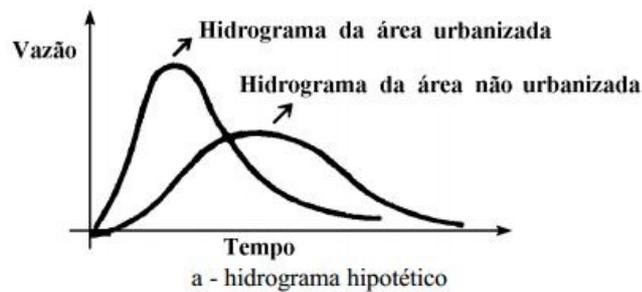
A sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana pode trazer graves prejuízos sociais e econômicos. Segundo Chocat<sup>2</sup> (1997 apud ACIOLI, 2005), 50% do total de vítimas de catástrofes naturais no mundo são causadas pelos eventos de cheias e enchentes urbanas que se repetem e agravam a cada ano, devido ao crescimento desordenado das cidades e a acelerada impermeabilização do solo urbano. Desta forma, pode-se ter uma ideia da dimensão dos problemas com a drenagem urbana e o que podem causar à sociedade, sendo que podem ter na maioria das vezes soluções simples.

---

<sup>2</sup> CHOCAT, B. *Encyclopédie de l'Hydrologie Urbaine et de l'Assainissement*. Paris: Tech&Doc, 1997.

Castro e Goldenfum (2010) afirmam que a urbanização provoca a diminuição das áreas de coberturas vegetais alterando as quantidades de água presentes em cada uma das etapas que compõe o ciclo hidrológico, pois a área impermeabilizada passa a direcionar uma maior quantidade da água precipitada para o escoamento superficial à medida que as quantidades de águas envolvidas nos processos de evapotranspiração, interceptação vegetal e infiltração são diminuídas em relação à situação original. Este fenômeno, além de aumentar os volumes escoados superficialmente, reduz o tempo de concentração, provocando assim hidrogramas de cheias cada vez mais críticos. O hidrograma típico de uma bacia natural e aqueles resultantes da urbanização podem ser vistos na figura 6.

Figura 6 – Impacto da urbanização no hidrograma



(fonte: adaptado de TUCCI, 1995, p. 18)

Araújo et al. (2000, p. 21) salienta que:

A drenagem urbana tem sido desenvolvida com o princípio de drenar a água das precipitações o mais rápido possível para jusante, produzindo aumento da frequência

e magnitude das enchentes. Este aumento traz consigo o acréscimo da produção de lixo e a deterioração da qualidade da água.

As ações públicas para as soluções desses problemas no Brasil estão voltadas, na maioria das vezes, somente para as medidas estruturais. As soluções geralmente encontradas por parte do poder público têm sido as redes de drenagem, que simplesmente transferem a inundação de um ponto para outro a jusante na bacia sem que se avaliem os reais benefícios da obra. Estas ações de visão local atuam sobre o efeito e não sobre as causas do aumento da vazão, que são: aumento das superfícies impermeáveis; aumento da densidade de drenagem (microdrenagem); redução da rugosidade mudança de geometria de cursos d'água naturais.

Torna-se evidente que a expansão acelerada das cidades pode vir a gerar graves riscos ao sistema de drenagem urbana. Para que não seja necessária uma intervenção por parte do poder público, que seria muito provavelmente a de criar novas redes ou substituir as existentes por diâmetros maiores, é necessário que toda alteração que o usuário urbano possa causar nas características do solo seja detectada com antecedência, ainda na fase de projeto, para que alguns cuidados sejam tomados no sentido de não alterar os efeitos causados pelas chuvas.

Araújo et al. (2000, p. 21) afirmam que “A tendência moderna na área de drenagem urbana, é a busca da manutenção das condições de pré-desenvolvimento atuando na fonte da geração do mesmo. Para tanto deve-se utilizar de dispositivos de acréscimo de infiltração e do aumento de retardo do escoamento.”. Isso garante que os impactos que vierem a ser gerados sejam mitigados na fonte, de forma que não causem maiores danos para as partes que se encontram a jusante.

### 3.4 EVENTOS DE PROJETO

De acordo com o Plano Diretor de Drenagem Urbana (PDDrU) (PORTO ALEGRE, 2005, p. 22), “A precipitação é a principal informação hidrológica de entrada utilizado no cálculo das vazões de projeto das obras de drenagem pluvial. A expressão **precipitação de projeto** identifica a precipitação utilizada na geração do **hidrograma ou vazão de projeto**.”.

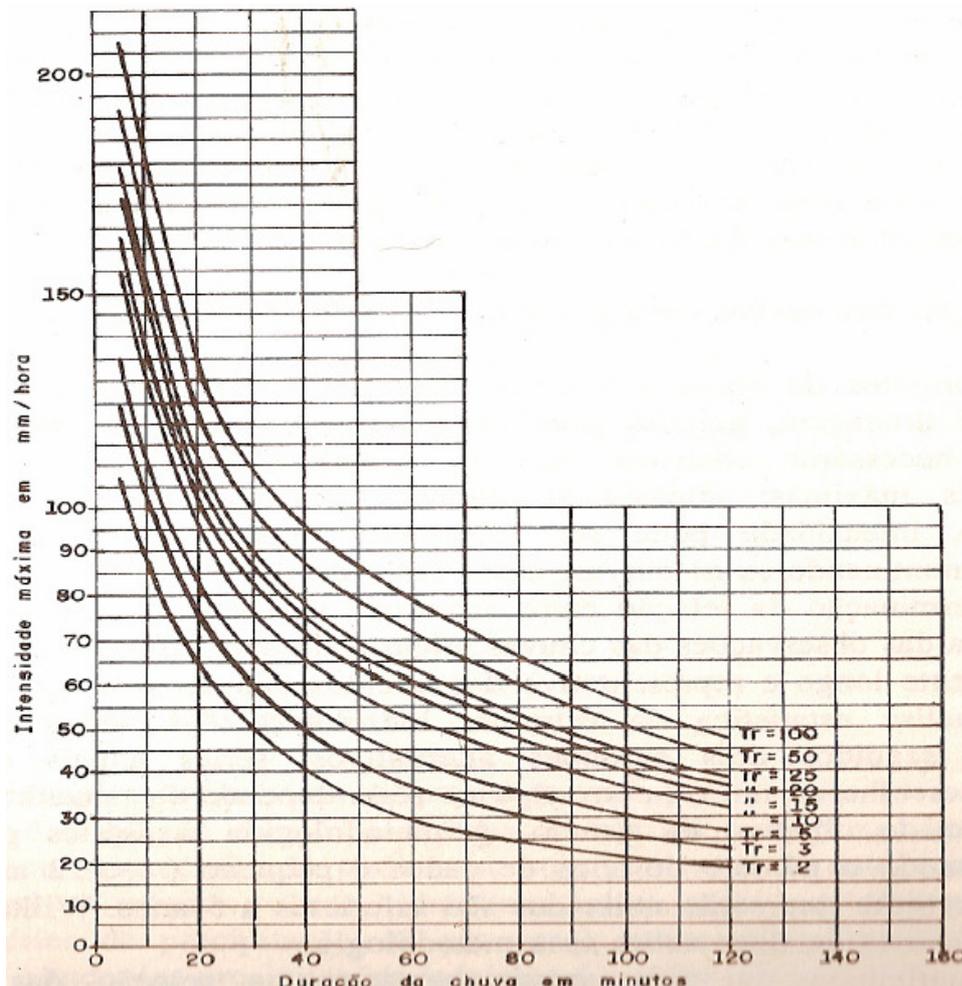
Para o projeto e execução de obras de drenagem pluvial é necessária a utilização de hietogramas ou precipitações de projeto. Conforme o PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005, p. 23):

As precipitações de projeto são normalmente determinadas a partir de relações intensidade-duração-frequencia (curvas IDF) da bacia contribuinte. Expressas sob forma de tabelas ou equações, as curvas IDF fornecem a intensidade da precipitação para qualquer duração e período de retorno. Pode-se obter uma lâmina ou altura de

precipitação, multiplicando-se a intensidade dada pela IDF pela sua correspondente duração.

A chuva de projeto é um evento crítico, criado artificialmente a partir de dados estatísticos da chuva observada e de parâmetros de resposta da bacia hidrográfica. No PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005), são encontradas curvas e equações IDF representativas para quatro regiões distintas do município de Porto Alegre. A IDF de um determinado local, como pode ser visto na figura 7, fornece a intensidade da chuva em milímetros por hora para uma determinada duração e um determinado tempo de retorno, que varia de acordo com o tipo e o porte de obra a ser dimensionada.

Figura 7 – Curva IDF para a cidade de Porto Alegre



(fonte: TUCCI, 2007, p. 202)

O **tempo de retorno** é o número de anos que, em média, um evento é igualado ou superado. Trata-se de uma variável que indica ainda o risco adotado ao projeto, através da relação

investimentos envolvidos para reduzir a frequência das inundações e os prejuízos aceitos. Ao se adotar um risco de 10% anualmente ou tempo de retorno de 10 anos, está se admitindo que em média possam ocorrer eventos que gerem prejuízos uma vez a cada 10 anos. A análise adequada do tempo de retorno a ser utilizado envolve uma avaliação econômica e social dos impactos das enchentes para definição dos riscos. O projetista deve procurar usar o limite superior apresentado na tabela para o tempo de retorno sempre que se tratar de eventos que possam trazer grandes riscos à vida humana ou potencial interferência em obras de infraestrutura, como hospitais e subestações elétricas. Os riscos usualmente adotados são apresentados na tabela 3 (TUCCI, [20--?]).

Tabela 3 – Tempo de retorno para sistemas urbanos

SISTEMA	CARACTERÍSTICA	INTERVALO	VALOR FREQUENTE
Microdrenagem	Residencial	2 – 5	2
	Comercial	2 – 5	5
	Áreas de prédios públicos	2 – 5	5
	Aeroporto	5 – 10	5
	Áreas comerciais e avenidas	5 – 10	10
Macrodrenagem		10 – 25	10
Zoneamento de áreas ribeirinhas		5 – 100	100

(fonte: TUCCI, [20--?], p. 54)

Segundo Porto Alegre (2005), a **duração da chuva** possui uma grande variação dentro de um mesmo evento assim como de um evento para outro. A variabilidade temporal nas chuvas de projeto depende do método hidrológico utilizado. O Método Racional considera a chuva de projeto com intensidade constante em toda a sua duração, retirada diretamente da curva IDF. Já os métodos baseados em hidrogramas unitários utilizam a precipitação variável no tempo. O Manual de Drenagem Urbana de Porto Alegre (PORTO ALEGRE, 2005) apresenta o método de blocos alternados, que constrói o hietograma de projeto a partir da curva IDF.

O PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005) faz algumas observações para a determinação da duração da chuva e sugere que:

- a) duração total da precipitação seja igual ou maior que o tempo de concentração da bacia, permitindo que toda ela sofra com o efeito da precipitação;
- b) tempo total da simulação seja pelo menos duas vezes o tempo de concentração, permitindo que toda precipitação atue sobre o hidrograma de saída;
- c) intervalo de tempo das precipitações deve ser igual a pelo menos um terço do tempo de pico do hidrograma unitário da bacia para permitir a correta definição da subida do hidrograma e da vazão de pico.

O **método dos blocos alternados** distribui a precipitação ao longo do tempo de forma a buscar um cenário crítico de precipitação. Este método é geral e permite que o projetista escolha onde posicionar o pico da chuva, podendo estar no início, meio ou final do evento, procurando a situação mais desfavorável, mas que seja possível de ocorrer.

O método pode ser descrito basicamente em três etapas (PORTO ALEGRE, 2005):

- a) para o tempo de retorno escolhido, calcular a precipitação relativa à duração, espaçadas pelo intervalo de tempo até a duração final através da curva IDF;
- b) desacumular os valores das precipitações obtidas em cada intervalo de tempo, ou seja, fazer a diferença entre dois intervalos sucessivos para encontrar o valor de cada intervalo;
- c) reordenar os valores posicionando o maior valor no intervalo previamente definido, por exemplo na metade da duração total, o segundo maior valor logo após o de maior valor e o terceiro antes do de maior valor, assim por diante.

A transformação da precipitação em vazão pode ser feita através do modelo hidrológico proposto pelo Soil Conservation Service (SCS) (TUCCI, 2007). Esse modelo hidrológico tem dois componentes, a estimativa da precipitação efetiva pelo método do coeficiente CN (Curva Número) e a geração do hidrograma de projeto pelo método do hidrograma unitário sintético.

A classificação apresentada no quadro 1 indica para um solo de classificação A, um menor valor do coeficiente CN, o extremo da condição mais permeável, de forma a gerar menor escoamento superficial. E assim, o valor do coeficiente CN e consequentemente a impermeabilidade aumenta para as outras classificações. Desta forma, um solo de classificação D, apresenta valor de coeficiente CN maior se comparado com os demais, sendo para esta classificação o extremo da condição impermeável.

Quando o tipo hidrológico do solo e as condições de utilização ou cobertura do solo da área em questão forem heterogêneos, ou seja, composta de diferentes valores para o coeficiente

CN, o valor deste coeficiente é obtido pela média ponderada das áreas com regiões homogêneas na qual foi subdividida a bacia, de acordo com a fórmula 3:

$$CN = \frac{\sum_i^n CN_i \times A_{bi}}{\sum_i^n A_{bi}} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

CN = Coeficiente da bacia com áreas heterogêneas;

CN<sub>i</sub> = Coeficiente da área homogênea i;

A<sub>bi</sub> = área da região homogênea i.

Quadro 1 – Classificação hidrológica dos solos pelo método SCS

Grupo	Características
A	Solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.
B	Solos arenosos menos profundos que os do Grupo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. Nos casos de terras roxas este limite pode subir a 20% graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras nem camadas argilosas até 1,50m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.
C	Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,20m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser de 40% e 1,50m. Nota-se, a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no Grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.
D	Solos argilosos (30 – 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50cm de profundidade. Ou solo arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados.

(fonte: TUCCI, 2007, p. 404)

Tucci (2007) apresenta uma classificação para os valores do coeficiente CN de acordo com as regiões, sendo o caso das urbanas, suburbanas e agrícolas classificadas conforme a tabela 4, e para o caso de bacias rurais, conforme a tabela 5.

Tabela 4 – Número de escoamento para regiões urbanas, suburbanas e agrícolas

UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO	TIPO DE SOLO			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem medidas de conservação do solo	72	81	88	91
com medidas de conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou baldios: em más condições	68	79	86	89
em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas florestais: cobertura má, sem “Mulch”	45	66	77	83
boa cobertura	25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, cemitérios, etc.				
Boas condições: relva cobrindo mais de 75% da área	39	61	74	80
Condições razoáveis: relva cobrindo de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios (85% de área impermeável)	89	92	94	95
Zonas industriais (72 % de área impermeável)	81	88	91	93
Zonas residenciais:				
Áreas médias dos lotes				
Percentagem média impermeável				
< 500 m <sup>2</sup>	77	85	90	92
1000 m <sup>2</sup>	61	75	83	87
1300 m <sup>2</sup>	57	72	81	86
2000 m <sup>2</sup>	54	70	80	85
4000 m <sup>2</sup>	51	68	79	84
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Arruamentos e estradas:				
asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
gravilha	76	85	89	91
terra	72	82	87	89

(fonte: TUCCI, 2007, p. 406)

Tabela 5 – Número de escoamento para regiões rurais

UTILIZAÇÃO OU COBERTURA DO SOLO	CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE	TIPO DE SOLO			
		A	B	C	D
Solo lavrado		77	86	91	94
Culturas arvenses	Segundo o maior declive	64	76	84	88
	Segundo as curvas de nível	62	74	82	85
	Segundo as curvas de nível e em terraço	60	71	79	82
Rotações de culturas	Segundo o maior declive	62	75	83	87
	Segundo as curvas de nível	60	72	81	84
	Segundo as curvas de nível e em terraço	57	70	78	82
Pastagens	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Boa	39	61	74	80
	Pobre, segundo as curvas de nível	47	67	81	88
	Normal, segundo as curvas de nível	25	59	75	83
	Boa, segundo as curvas de nível	6	35	70	79
Prado permanente	Normal	30	58	71	78
Zonas sociais rurais	Normal	59	74	82	86
Estradas	Pavimento permeável	72	82	87	89
	Pavimento impermeável	74	84	90	92
Florestas	Muito abertas ou de baixa transpiração	56	75	86	91
	Abertas ou de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normal	36	60	73	79
	Densas ou de alta transpiração	25	55	70	77
	Muito densas ou de alta transpiração	15	44	54	61
Superfície impermeável		100	100	100	100

(fonte: TUCCI, 2007, p. 405)

Os valores do coeficiente CN apresentados nas tabelas anteriores são para a condição de chuvas antecedentes médias para cheias anuais (condição II). Podendo esta também ser classificada em condição I, representativo para um solo seco, ou condição III, que representa um solo que foi submetido a chuvas intensas ou leves com baixas temperaturas nos 5 dias

anteriores (TUCCI, 2007). Os fatores de conversão para o coeficiente CN em função da condição anterior são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Conversão do coeficiente CN para as diferentes condições de umidade

Condições de umidade		
I	II	III
100	100	100
87	95	99
78	90	98
70	85	97
63	80	94
57	75	91
51	70	87
45	65	83
40	60	79
35	55	75
31	50	70
27	45	65
23	40	60
19	35	55
15	30	50

(fonte: SOIL CONSERVATION SERVICE<sup>3</sup>, 1972 apud SANCHÉZ, 2008, p. 270)

Nas etapas de planejamento e projeto de obras de drenagem tipicamente é utilizado este modelo hidrológico. Tucci (2007) acrescenta também que o método do SCS foi desenvolvido a partir de informações de bacias agrícolas em muitas regiões dos Estados Unidos, relacionando dados de chuvas e vazões e representa o modelo ideal a ser utilizado em bacias hidrográficas com carência de dados observados de vazão. O resultado obtido é representado pela fórmula 4:

$$P_{esc} = \frac{(I - 0,2S)^2}{I + 0,8S} \quad (\text{fórmula 4})$$

<sup>3</sup> SOIL CONSERVATION SERVICE. Hidrology. **National engineering handbook**. Washington: USDA, p. 101-1023, 1972.

Onde:

$P_{esc}$  = precipitação efetiva (mm);

$I$  = precipitação total (mm);

$S$  = máxima capacidade de retenção da bacia no início da chuva (mm).

As perdas iniciais consideradas no método incluem a interceptação, detenção superficial e a água que infiltra antes de iniciar o escoamento. O valor de  $S$  na fórmula 4 leva em conta o estado de umidade inicial do solo, uso do solo e práticas de manejo do mesmo, e é definido pela fórmula 5.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

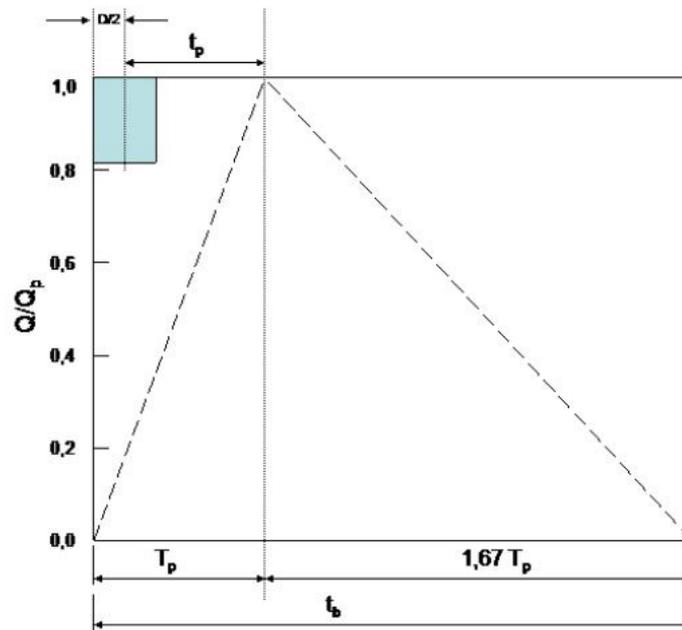
CN = valor do coeficiente CN.

Este modelo considera para cada configuração de solo um valor de coeficiente CN que varia de 0 a 100, sendo o valor 100 a representação de uma condição totalmente impermeável e o valor 0 a condição permeável.

Para a composição de um hidrograma representativo de uma bacia é necessário se ter dados hidrológicos da bacia estudada, como isso nem sempre é possível, em muitos casos, é necessário calcular o hidrograma de projeto, utilizando métodos indiretos, um deles é o Hidrograma Unitário Sintético do modelo SCS. O hidrograma unitário é o hidrograma resultante de um escoamento superficial de volume unitário. O volume unitário é decorrente da chuva unitária, que corresponde à altura pluviométrica e duração unitária.

Conhecido o Hidrograma Unitário de uma bacia, pode-se calcular as ordenadas do escoamento superficial correspondentes à qualquer chuva, de intensidade uniforme e duração igual àquela que gerou o Hidrograma Unitário, através da convolução. Este se baseia nas características físicas da bacia que influenciam diretamente o escoamento, no caso do Hidrograma Triangular do SCS, os parâmetros utilizados para definir o hidrograma são o tempo de pico ( $t_p$ ), o tempo de base ( $t_b$ ) e a vazão de pico ( $q_p$ ), conforme figura 8.

Figura 8 – Forma do hidrograma unitário sintético triangular do SCS



(fonte: SOIL CONSERVATION SERVICE<sup>4</sup>, 1972 apud SANCHÉZ, 2008, p. 270)

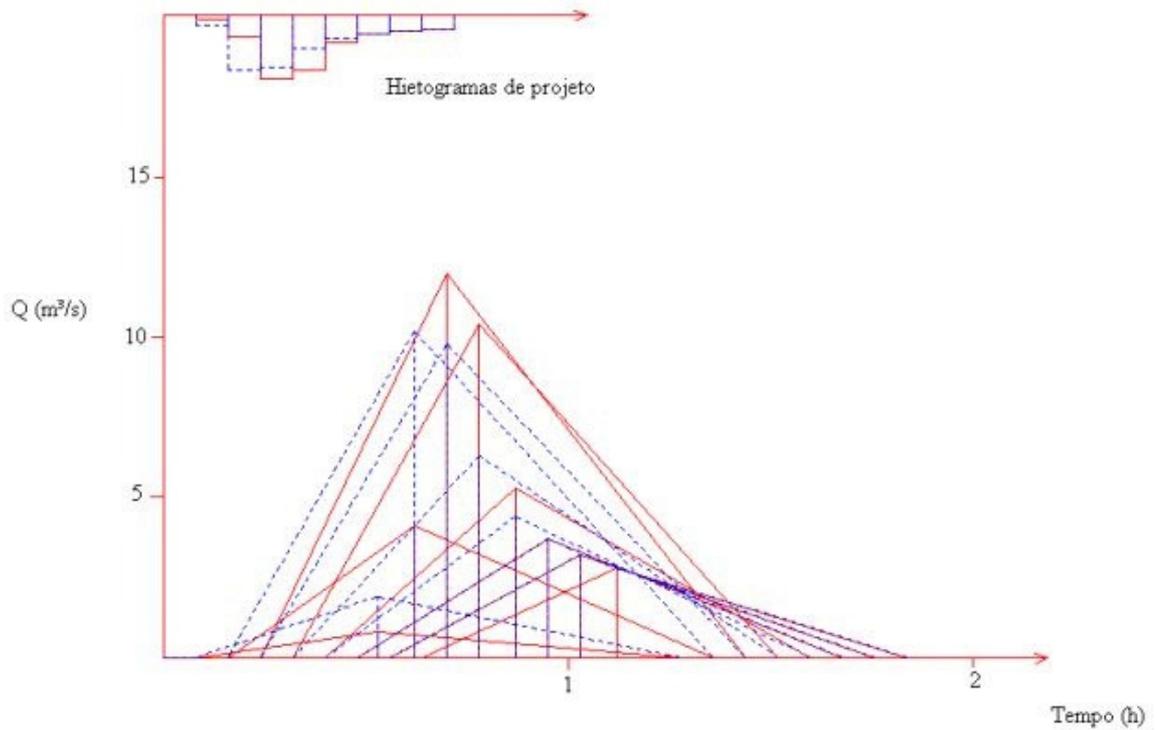
Tucci (2007) salienta que o hidrograma unitário é talvez o principal operador chuva-vazão da hidrologia básica e possui inúmeras aplicações. Reconhecendo a bacia como um sistema linear e, portanto, obedecendo ao princípio da superposição, pode-se efetuar a convolução com cada intervalo de precipitação e depois somar os resultados parciais para então formar o hidrograma resultante a partir da composição linear dos diversos hidrogramas defasados, como se visualiza na figura 9. Nessa figura, os hidrogramas parciais gerados por dois eventos de precipitação são apresentados, o primeiro em linha contínua e o segundo em linhas tracejadas. Cada hidrograma parcial foi gerado a partir da precipitação que acontece em um intervalo de tempo. É importante ressaltar que os valores das precipitações são diferentes em cada intervalo de tempo e por isso o valor das ordenadas dos hidrogramas parciais resulta diferente. Os hidrogramas resultantes para esses dois eventos de precipitação são obtidos pela somatória das ordenadas de cada um dos hidrogramas parciais gerado por cada evento, em cada intervalo de tempo.

A transformação de precipitação em vazão pelo método do SCS pode ser realizada com a utilização do *software* computacional IPHS1, desenvolvido no IPH da UFRGS juntamente com a Faculdade de Engenharia Agrícola da UFPeL. Para realizar este processo é necessário

<sup>4</sup> SOIL CONSERVATION SERVICE. Hidrology. **National engineering handbook**. Washington: USDA, p. 101-1023, 1972.

entrar com as informações e características da bacia e com evento chuva a ser propagado, e a partir disso se obtém o hidrograma resultante.

Figura 9 – Exemplo de convolução de hidrogramas unitários



(fonte: FILHO; COSTA, 2007, p. 11)

## 4 DISPOSITIVOS DE CONTROLE PLUVIAL

As medidas de retenção de águas pluviais dependem do estágio de desenvolvimento da área em questão. As principais medidas sustentáveis na fonte tem sido a retenção de água no lote (pequeno reservatório) e o uso de áreas de infiltração para recuperar a capacidade de infiltração da bacia e controlar a vazão máxima (TUCCI, 1995, p. 22). Dispositivos amplamente utilizados para estes fins, como os pavimentos permeáveis e telhados verdes, além de melhorar a qualidade da água efluente podem contribuir para o aumento da recarga de águas subterrâneas, como no caso dos primeiros. Essas duas soluções são o foco desse trabalho e descritas a seguir.

### 4.1 PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Urbanas e Stahre (1993, p. 79, tradução nossa) descrevem:

Os pavimentos permeáveis são um material permeável que permite a percolação de águas pluviais que incidem sobre o pavimento para uma base de agregados. Os pavimentos são constituídos por agregados graúdos cimentados com concreto ou asfalto. Quando a água atinge a base da camada de agregados, ou se infiltra no solo, ou é transportado para o sistema de drenagem.

Estes dispositivos podem ser compostos e definidos de diferentes maneiras. De acordo com Schueler<sup>5</sup> (1987 apud ARAÚJO et al. 2000), os pavimentos permeáveis são constituídos pela composição de duas camadas de agregados, uma composta de agregado fino ou médio e outra de agregado graúdo, mais a camada do pavimento permeável propriamente dito, pela qual a água percola superficialmente.

A camada superior dos pavimentos de concreto ou asfalto poroso é construída de forma semelhante aos pavimentos convencionais, só que aqueles não possuem a fração de areia fina misturadas aos agregados do pavimento. Os pavimentos constituídos de blocos vazados são construídos sobre uma camada base composta por material granular, geralmente areia. Neste

---

<sup>5</sup> SCHUELER, T. **Controlling Urban Runoff**: a practical manual for planning and designing urban BMPs. Washington: Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

tipo de pavimentos são instalados filtros geotêxteis para evitar a migração de areia para a camada granular (ARAÚJO et al., 2000).

O escoamento infiltra rapidamente na camada do revestimento pelo fato dele ser poroso ou ser vazado de espessura que varia de 5 a 10 cm. Após, passa por um filtro de agregados de menor diâmetro e com espessura em torno de 2,5 cm. Posteriormente, é direcionado para o reservatório de pedras que é composto por agregados graúdos. Esta camada é dimensionada de acordo com a quantidade de água que se deseja reter. Nesta camada o escoamento poderá então ser infiltrado para o solo ou transportado para uma saída.

Nos próximos itens será feita uma abordagem quanto à classificação, parâmetros e limitações da utilização deste dispositivo.

#### **4.1.1 Classificação**

Urbonas e Stahre (1993) classificam os pavimentos permeáveis basicamente em três tipos, conforme figura 10:

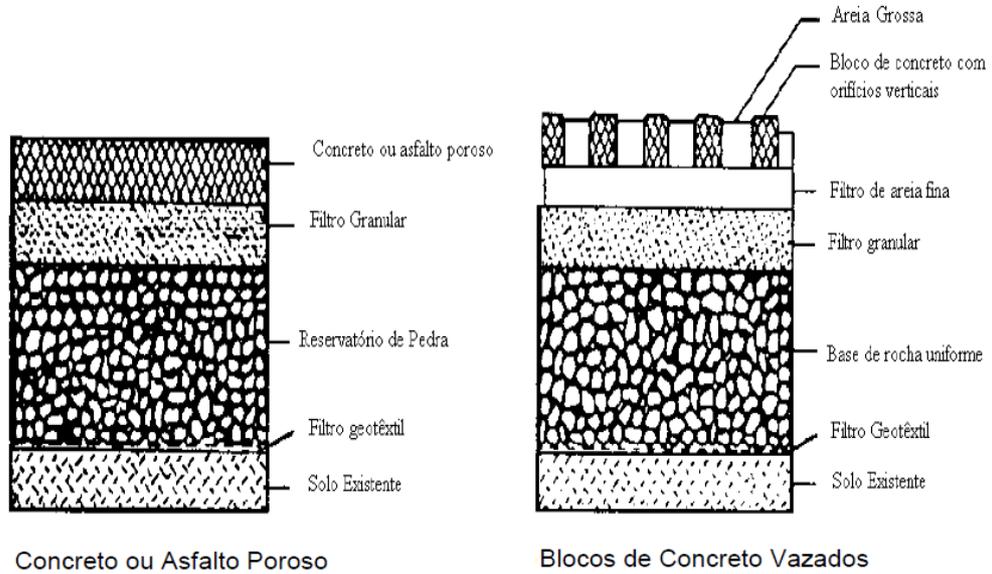
- a) concreto poroso;
- b) asfalto poroso;
- c) blocos de concreto vazados preenchidos com material granular, como areia ou vegetação rasteira, como grama.

Segundo Azzout et al.<sup>6</sup> (1994 apud ACIOLI, 2005) os pavimentos permeáveis podem possuir revestimento drenante ou impermeável e ainda ter a função de infiltração ou apenas de armazenamento. Na figura 11 estão ilustrados quatro tipos de pavimentos com estrutura de reservatório, sendo que neste caso a água armazenada pode ser reutilizada para fins não potáveis, ao invés de ser devolvida para o sistema de drenagem.

---

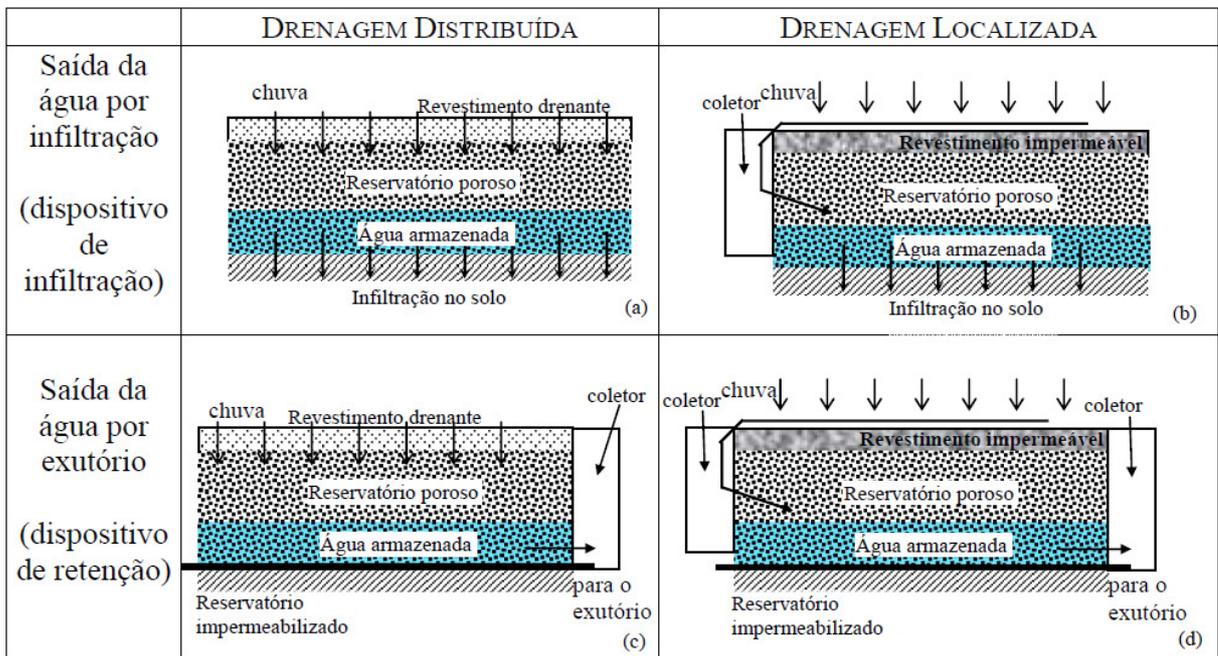
<sup>6</sup> AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F. N.; ALFAKIH, E. **Techniques alternatives en assainissement pluvial**. Paris: Technique et Documentation, 1994.

Figura 10 – Tipos de pavimentos permeáveis



(fonte: URBONAS; STAHRÉ, 1993, p. 52)

Figura 11 – Exemplos de diferentes tipos de pavimentos com reservatório estrutural



(fonte: AZZOUT<sup>7</sup> et al., 1994 apud ACIOLI, 2005, p. 11)

<sup>7</sup> AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F. N.; ALFAKIH, E. **Techniques alternatives en assainissement pluvial**. Paris: Technique et Documentation, 1994.

Schueler<sup>8</sup> (1987 apud ACIOLI, 2005, p. 11-12) classifica os pavimentos permeáveis em três tipos básicos de acordo com o volume de água armazenado e da capacidade de infiltração do solo como pode ser visto na figura 12, são eles:

- a) **sistema de infiltração total** – o único meio de saída do escoamento é através da infiltração no solo. Portanto, o reservatório de pedras deve ser grande o suficiente para acomodar o volume do escoamento de uma chuva de projeto, menos o volume que é infiltrado durante a chuva. Desse modo, o sistema promove o controle total da descarga de pico, do volume e da qualidade da água, para todos os eventos de chuva de magnitude inferior ou igual à chuva de projeto;
- b) **sistema de infiltração parcial** – nos casos em que o solo não possui uma boa taxa de infiltração, deve ser utilizado o sistema de infiltração parcial. Nesse caso, deve ser instalado um sistema de drenagem enterrado, que consta de tubos perfurados espaçados regularmente, localizados na parte superior do reservatório de pedras. O sistema funciona no sentido de coletar o escoamento que não seria contido pelo reservatório de pedras, levando-o para uma saída central. O autor sugere que o tamanho e espaçamento da rede de drenagem devam ser dimensionados de modo a receber no mínimo uma chuva de dois anos de tempo de retorno;
- c) **sistema de infiltração para controle da qualidade da água** – este sistema é utilizado para coletar apenas o *first flush* do escoamento, que é o fluxo inicial da chuva, que contém a maior concentração de poluentes. Os volumes em excesso não são tratados pelo sistema, sendo transportados através de drenos para um coletor de água pluvial.

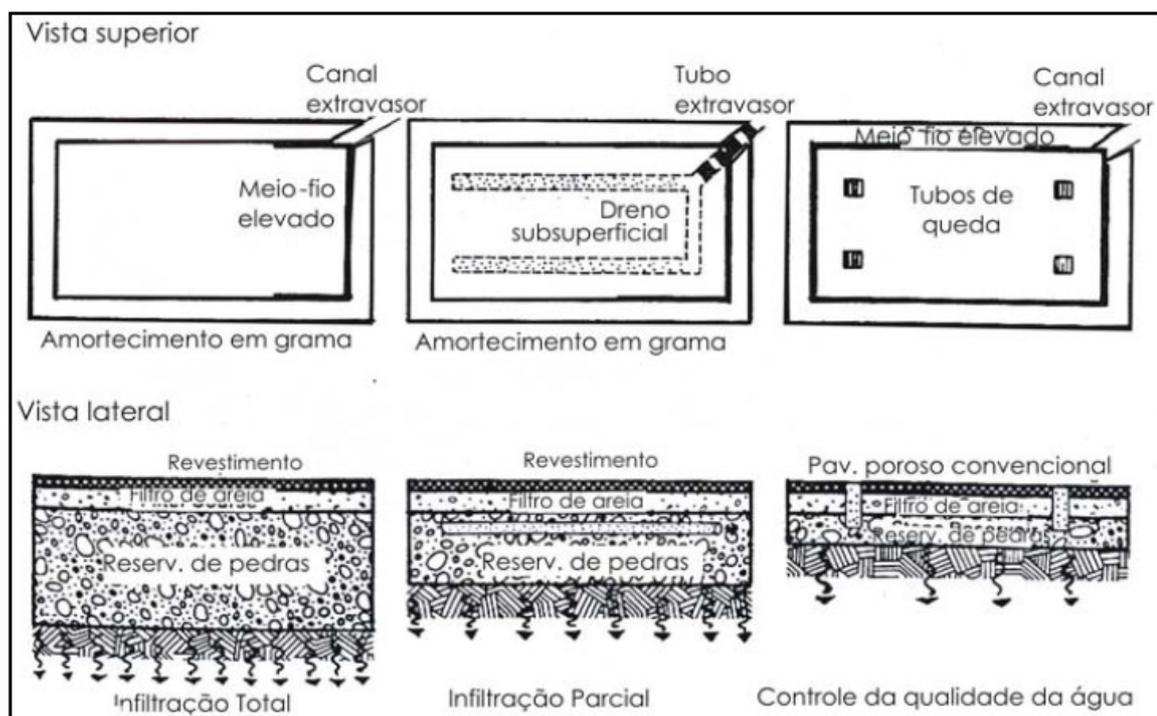
#### 4.1.2 Coeficientes de escoamento

O PDDrU (PORTO ALEGRE, 2005) apresenta uma tabela com coeficientes de escoamento com base nas superfícies de revestimento (tabela 7). Não há variação dos coeficientes para utilização de tempos de retorno na microdrenagem e nem com a variação da intensidade da precipitação já que é uma das premissas utilizadas pelo método.

---

<sup>8</sup> SCHUELLER, T. **Controlling Urban Runoff**: a practical manual for planning and designing urban BMPs. Washington: Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

Figura 12 – Representação esquemática de alguns tipos de pavimentos



(fonte: adaptado de SCHUELER<sup>9</sup>, 1987 apud ACIOLI, 2005, p. 12)

Tabela 7 – Coeficiente de escoamento de acordo com superfícies de revestimento

Superfície	C
<b>Pavimento:</b>	
Asfalto	0,70 – 0,95
Concreto	0,80 – 0,95
Calçadas	0,75 – 0,85
Telhado	0,75 – 0,95
<b>Cobertura: grama/areia</b>	
plano (declividade 2%)	0,05 – 0,10
médio (declividade de 2 a 7%)	0,10 – 0,15
alta (declividade 7%)	0,15 – 0,20
<b>Grama, solo pesado:</b>	
plano (declividade 2%)	0,13 – 0,17
médio (declividade de 2 a 7%)	0,18 – 0,22
alta (declividade 7%)	0,25 – 0,35

(fonte: PORTO ALEGRE, 2005, p. 87)

Araújo et al. (2000) realizaram um experimento simulando uma precipitação sobre uma área de 1 m<sup>2</sup> de alguns tipos de solos e revestimentos: solo compactado, concreto, bloco de

<sup>9</sup> SCHUELLER, T. **Controlling Urban Runoff**: a practical manual for planning and designing urban BMPs. Washington: Metropolitan Washington Council of Governments, 1987.

concreto, paralelepípedo, concreto poroso e blocos vazados. O resumo dos resultados das simulações pode ser observado na tabela 8.

Tabela 8 – Resultado das chuvas nas superfícies simuladas

	Solo Compactado	Concreto	Bloco de Concreto	Paralelepípedo	Concreto Poroso	Blocos Vazados
Data	03/06/98	28/10/98	29/07/98	13/10/98	13/04/99	27/01/11
Hora início	14h06min	15h15min	15h20min	11h20min	14h55min	10h08min
Intensidade simulada (mm/h)	112	110	116	110	120	110
Chuva total (mm)	18,66	18,33	19,33	18,33	20,00	18,33
Escoamento total (mm)	12,32	17,45	15,00	10,99	0,01	0,5
Coefficiente de escoamento	0,66	0,95	0,78	0,60	0,005	0,03
Umidade inicial do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	32,81	32,73	32,71	32,72	0,329	32,24

(fonte: ARAÚJO et al., 2000, p. 27)

Analisando os dados da tabela 8, é possível perceber que a utilização de pavimentos de concreto poroso e blocos vazados alcançam resultados superiores em relação ao solo compactado, revestimento muito encontrado nas condições de pré-urbanização, pela passagem de veículos, onde não existe pavimentação. Os resultados são ainda mais expressivos se comparados aos pavimentos permeáveis com outras alternativas típicas de pavimentação. Para a chuva simulada, quando esta incide sobre uma superfície de concreto, 95% da água escoa superficialmente, em relação ao concreto poroso, praticamente 100% do volume precipitado infiltra para o substrato.

No entanto, essas análises correspondem a uma situação do pavimento permeáveis em condições ideais, onde toda a sua capacidade está disponível para amortecer o evento de chuva, sem considerar influência da precipitação antecedente. Além disso, a situação típica em que estes dispositivos se encontram carece de uma manutenção adequada provocando que os coeficientes de escoamento sejam maiores que os de projeto. Por fim, eventos superiores ao de projeto desses dispositivos também estarão associados a maiores valores do coeficiente de escoamento.

### 4.1.3 Limitações

Urbanas e Stahre (1993) salientam que as únicas limitações existentes na utilização de dispositivos permeáveis são:

- a) baixa permeabilidade do solo fazendo com que a água se infiltra com taxas muito baixas;
- b) nível de lençol freático alto;
- c) solo com camada impermeável, neste caso o pavimento permeável pode funcionar como poço de detenção;
- d) necessidade de manutenção, para o perfeito funcionamento.

## 4.2 TELHADOS VERDES

O uso de vegetação plantada sobre coberturas de edificações recebe inúmeras expressões na literatura, entre elas, telhados verdes, telhados verdes vivos, telhados vivos, coberturas verdes, coberturas vivas, coberturas vegetais, biotelhas e ecotelhas. Neste trabalho será utilizado a denominação de telhado verde.

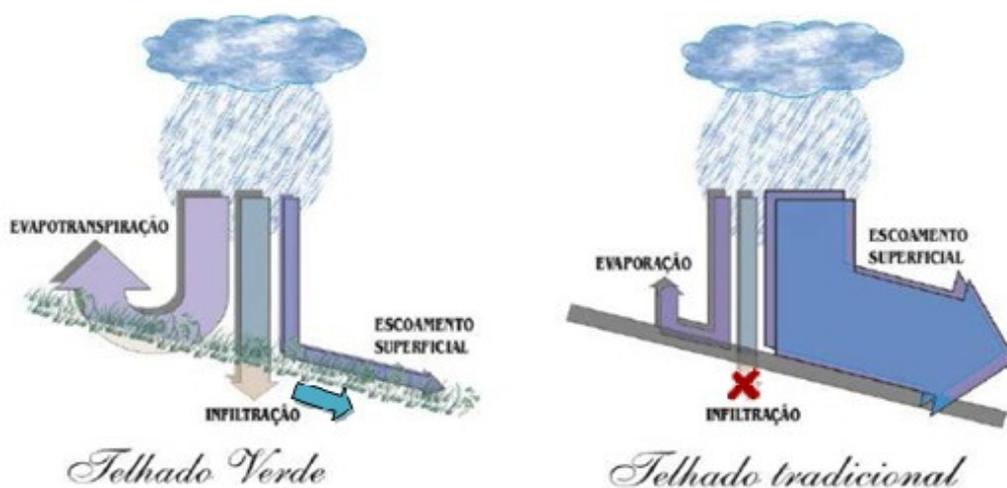
Castro e Goldenfum (2010) definem estes dispositivos como estruturas que se caracterizam pela aplicação de cobertura vegetal em coberturas de edificações, seguida de camada de drenagem e impermeabilização. Estas alternativas de cobertura são capazes de proporcionar diversas vantagens em relação ao sistema convencional, dentre elas a diminuição do escoamento que seria direcionada ao sistema de esgoto pluvial, melhoria nas condições térmicas, além de um visual paisagístico. A diminuição do escoamento de águas pluviais ocorre porque o telhado é composto por plantas que têm a capacidade de reter água e atrasar a vazão de pico do escoamento, pois ocorre absorção da água no telhado verde que posteriormente é devolvida ao ciclo hidrológico através do processo de evapotranspiração, conforme figura 13. Este tipo de recurso está sendo muito utilizado nos países da Europa e nos Estados Unidos da América, não somente em edifícios residenciais.

Segundo Araújo (2007, p. 5) os elementos que compõe a estrutura de telhados verdes, conforme figura 14, são:

- a) **laje** – elemento estrutural onde devem ser consideradas as cargas permanentes e as cargas acidentais, também pode ser utilizado outro suporte estrutural;

- b) **camada impermeabilizante** – a função é proteger o elemento estrutural de infiltrações, podem ser utilizados materiais diferentes como betuminosos e sintéticos;
- c) **isolante térmico** – é utilizado de acordo com a incidência de energia solar que a cobertura absorve, poliestireno extrudado pode ser utilizado como material isolante térmico;
- d) **camada drenante** – tem como função dar vazão ao excesso de água no solo, pode ser constituída de argila expandida, brita ou seixos de diâmetros semelhantes, sendo fundamental para o sistema. Sua espessura pode variar de 7 a 10 cm, elementos industrializados a base de poliestireno são frequentemente utilizados na Europa por também terem características de isolantes térmicos.
- e) **camada filtrante** – evita que a água das chuvas e das regas arraste as partículas de solo do telhado verde, utiliza-se normalmente uma manta geotêxtil;
- f) **solo** – substrato orgânico que deve possuir boa drenagem, de preferência um solo não argiloso que apresente uma boa composição mineral de nutrientes para o sucesso das plantas, a espessura varia de acordo com o tamanho das plantas, quanto maior forem as plantas maior será a sua profundidade do solo;
- g) **vegetação** – para a sua escolha é necessário o conhecimento do clima local, o tipo de substrato a ser utilizado, tipo de manutenção que será adotada no telhado verde, no caso de irrigações, o ideal é a escolha de plantas que não são exigentes a umidade, resistem bem ao estresse hídrico.

Figura 13 – Comparação do escoamento entre um telhado verde com uma cobertura tradicional



(fonte: adaptado de LAAR<sup>10</sup>, 2001 apud ARAÚJO 2007, p. 9)

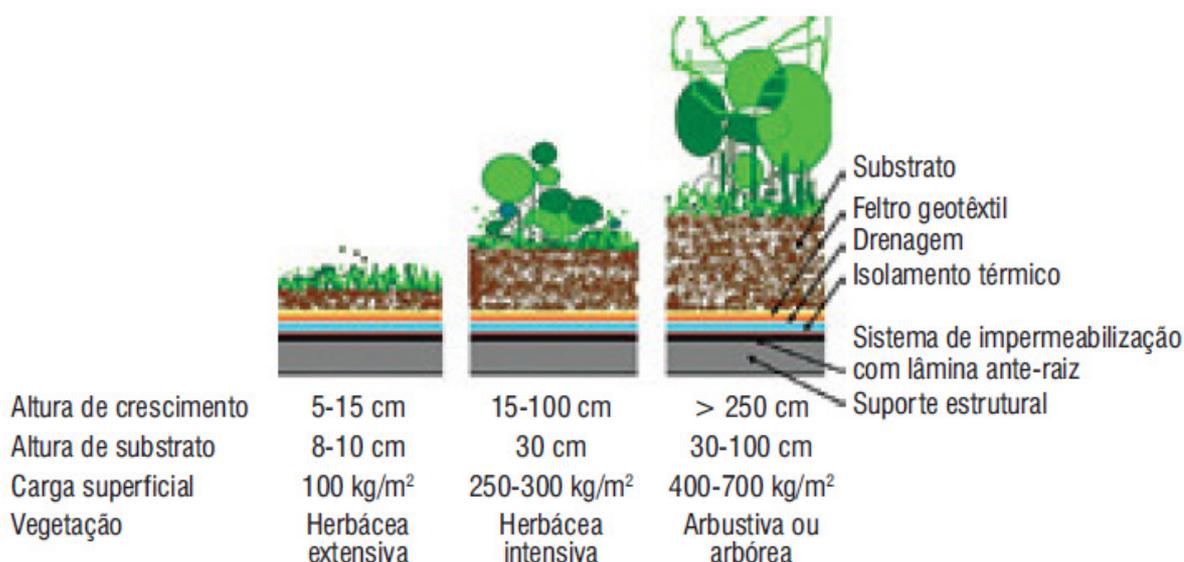
Nos próximos itens será feita uma abordagem quanto à classificação, parâmetros e limitações da utilização deste dispositivo.

<sup>10</sup> LAAR, M. Estudo de aplicação de plantas em telhados vivos extensivos em cidades de clima tropical. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: UNICAMP, 2001. Não paginado.

### 4.2.1 Classificação

Os telhados verdes são divididos basicamente em dois grandes grupos principais em relação às características da vegetação que os ocupa, são eles os extensivos e os intensivos, conforme figura 14. Os **extensivos** são caracterizados por possuir camada de substrato menor do que 20 cm, plantas de pequeno porte que exigem pouca manutenção, devido ao seu lento e baixo crescimento, e por consequência, possuem baixo peso. As coberturas verdes **intensivas** se caracterizam por ter a camada de substrato com mais de 20 cm de espessura, são constituídos de plantas e arbustos de médio porte, que exigem de um ambiente mais complexo, estas exigem uma cobertura reforçada e com as cargas mais bem distribuídas devido aos esforços extras promovidos pelas plantas, solo e água (CORREA; GONZALES<sup>11</sup>, 2002 apud ARAÚJO, 2007).

Figura 14 – Tipos de coberturas com telhados verdes



(fonte: CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E AGRONOMIA DO RIO GRANDE DO SUL, 2007, p. 28)

Os telhados verdes que apresentam cobertura **arbustiva** ou **arbórea** são caracterizados pela ocupação de uma vegetação mais alta, geralmente superior a 2,5 m, não exigindo uma manutenção tão frequente. Este tipo de vegetação necessita de um substrato maior, algo que

<sup>11</sup> CORREA, C. B.; GONZALEZ, F. J. N. O uso de coberturas ecológicas na restauração de coberturas planas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DE ARQUITETURA E URBANISMO, 4., 2002, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Nutau, 2002. Não paginado.

pode variar de 30 a 100 cm, devido à presença de raízes maiores, gerando um acréscimo na sobrecarga da estrutura portante desta edificação.

#### 4.2.2 Coeficientes de escoamento

Robertson (2005, tradução nossa) desenvolveu uma pesquisa nos Estados Unidos da América para definir os coeficientes de escoamento em uma estrutura de telhado verde em relação a quantidade de chuva, o resultado pode ser visto na tabela 9.

Tabela 9 – Valores de coeficiente de escoamento em relação à quantidade de chuva

Classificação	Quantidade de chuva	Coeficiente de escoamento
Baixa	< 13 mm	0,07
Média	13 mm – 25 mm	0,13
Alta	25 mm – 39 mm	0,25
Muito alta	> 39 mm	0,55

(fonte: ROBERTSON, 2005, p. 47, tradução nossa)

Analisando os dados da tabela 9 pode-se perceber que o coeficiente de escoamento aumenta à medida que a quantidade de chuva aumenta, este acréscimo fica em torno de 100% para cada aumento do nível de chuva. Cunha (2004) observou a capacidade de retenção de água dos telhados verdes através do balanço hídrico. O autor considerou uma precipitação de 35,41 mm e observou que a cobertura reteve 13,91 mm, mostrando que se trata de uma estrutura eficaz para a redução do pico da vazão.

Mentens et al. (2006, tradução nossa) demonstrou através de sua pesquisa que o coeficiente de escoamento superficial também pode variar de acordo com a espessura do substrato. Durante o trabalho explicou que em períodos quentes, 1 cm de substrato confere 2,5 mm a menos de escoamento, e também que o escoamento é inversamente proporcional à espessura do substrato. Os resultados desta pesquisa podem ser vistos na tabela 10.

Verificando os resultados representados na tabela 10 é possível afirmar que a coeficiente de escoamento é inversamente proporcional a quantidade de chuva, a medida que a espessura do

substrato aumenta o volume de água escoado superficialmente diminui, pois aumenta a quantidade de material capaz de absorver o volume de água.

Tabela 10 – Valores de coeficiente de escoamento em relação à espessura do substrato

Classificação	Espessura do Substrato	Coeficiente de escoamento
Fino	< 50 mm	0,38
Médio	50 mm – 150 mm	0,30
Grosso	> 150 mm	0,20

(fonte: MENTENS et al., 2006, tradução nossa)

### 4.2.3 Limitações

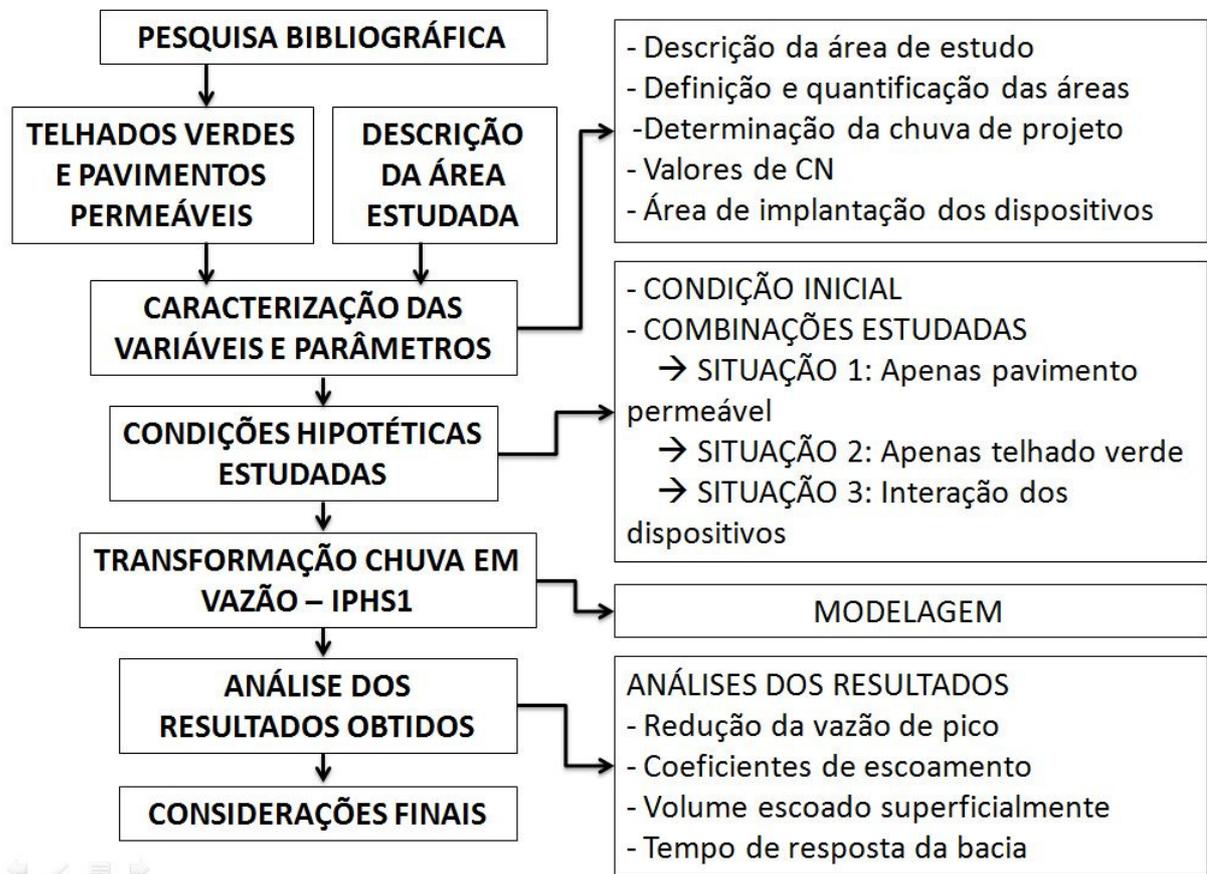
Cecchin ([20--?]) cita que as principais limitações e desvantagens deste tipo de dispositivo são:

- a) em regiões em que o clima é muito úmido, o substrato pode estar sempre saturado, de forma a não poder reter uma quantidade considerável de água;
- b) não é qualquer estrutura que pode suportar um pavimento permeável, ela deve ser dimensionada para tal propriedade;
- c) falta de manutenção pode gerar problemas que danifiquem a estrutura, como sobrecarga e infiltrações;
- d) alto custo de implantação e manutenção;
- e) vegetação inadequada pode ser perdida durante período muito crítico de temperaturas altas e escassa precipitação.

## 5 CARACTERIZAÇÃO E MODELAGEM

Nos capítulos anteriores foram abordados os conceitos para a formulação e o equacionamento do modelo que será realizado em uma determinada área para o município de Porto Alegre. A avaliação da redução dos valores de pico e dos volumes escoados com a utilização de dispositivos de controle pluvial no lote será desenvolvida conforme fluxograma da figura 15.

Figura 15 – Fluxograma detalhado do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Este capítulo discorrerá sobre a simulação matemática de cenários hipotéticos de utilização do pavimento permeável e do telhado verde como dispositivos de controle da drenagem pluvial para uma área comercial, de forma a avaliar os efeitos que estes causam para o sistema de macrodrenagem urbano. Para isso, é necessário que todas as variáveis envolvidas na pesquisa sejam definidas e caracterizadas.

## 5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS

Nesta seção serão definidas as características e parâmetros para a área estudada, bem como serão apresentadas e caracterizadas as variáveis que servirão para o desenvolvimento do modelo deste trabalho.

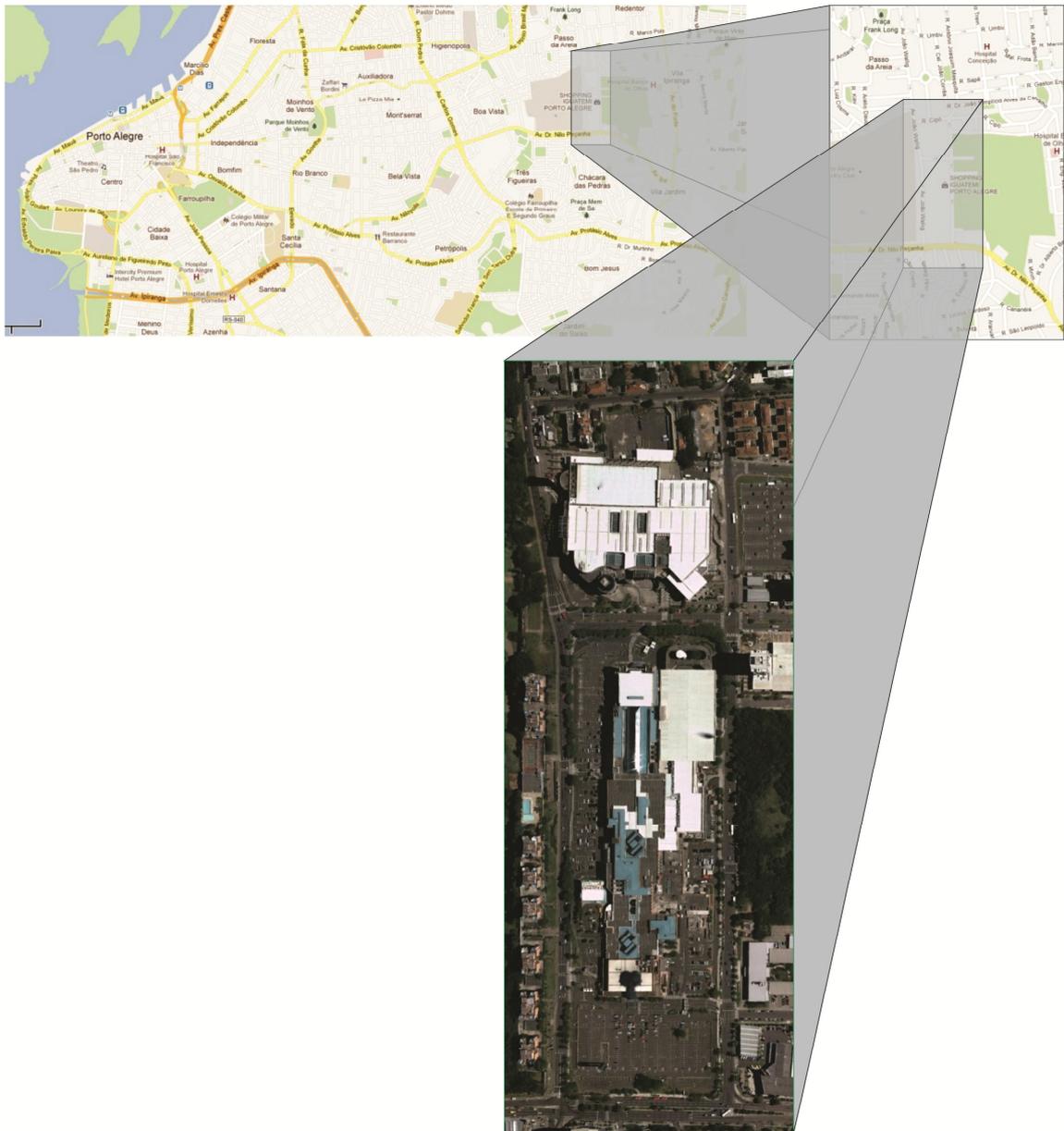
### 5.1.1 Descrição da área estudada

A área escolhida para a realização do estudo está situada na Zona Norte do município de Porto Alegre, no bairro Passo da Areia. A escolha foi realizada através de imagens de satélite, fornecidas pelo *software* Google Earth, onde se procurou uma área com alta taxa de impermeabilização e com boa definição da composição de suas superfícies. Na área escolhida estão situados dois *shoppings centers*, Shopping Iguatemi Porto Alegre e Shopping Bourbon Country, a área escolhida fica limitada pela Rua Cipó ao norte, pela Av. Nilo Peçanha ao sul, pela Av. João Wallig ao oeste e pela Rua Antônio Carlos Berta ao leste, conforme figura 16.

Esta área, além de possuir um relevo suave é composta quase que totalmente por área de estacionamento pavimentada e por cobertura de edificações, tendo baixa taxa de áreas tomadas por vegetações, o que torna viável os cenários hipotéticos analisados como emprego dos dispositivos abordados no presente trabalho.

É importante ressaltar que este estudo considera uma situação hipotética enquanto ao estudo de caso ao considerar que os escoamentos gerados nesse local são diretamente propagados para a rede de drenagem pluvial, sem a interposição de qualquer medida de controle diferente a aquelas aqui analisadas.

Figura 16 – Localização da área estudada no município de Porto Alegre



(fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2012)

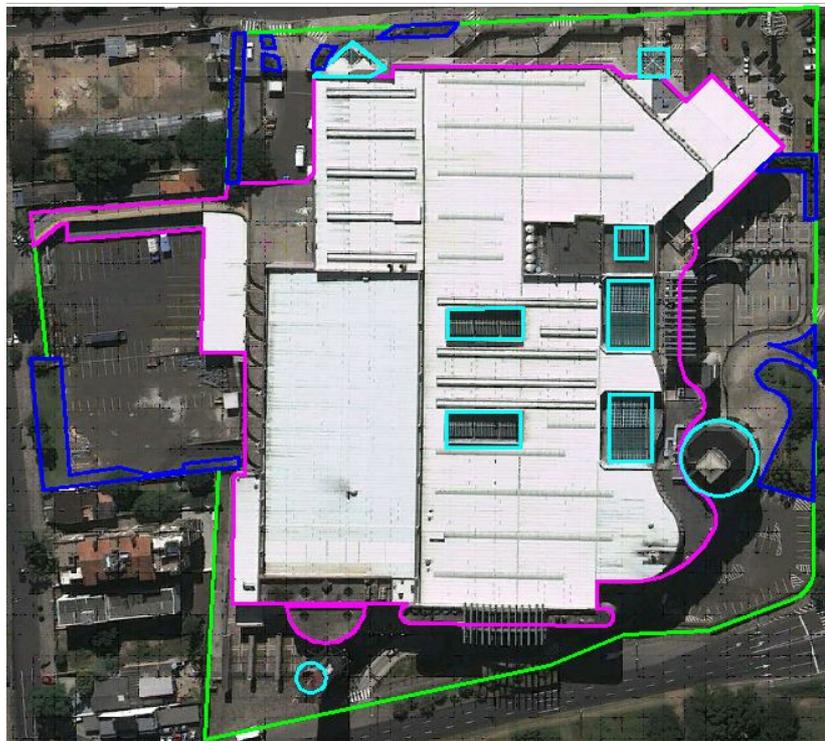
### 5.1.2 Definição e quantificação das áreas

A definição da composição da área estudada é muito importante pelo fato de que são as características dela que definirão as vazões e volumes que nela escoam, principalmente em função do parâmetro coeficiente de escoamento superficial. Através das imagens de satélite, obtidas pelo *software* Google Earth, foi possível classificar as superfícies que compõem a área em estudo, sendo que estas foram classificadas em quatro tipos:

- a) **vegetação** – principalmente composta por gramas e arbustos de pequeno porte;
- b) **coberturas** – constituídas basicamente por telhas de fibrocimento e por lajes de concreto;
- c) **pavimentos** – áreas destinadas a estacionamentos e passeios, compostas de concreto, asfalto ou pedras;
- d) **inalteráveis** – áreas de fins estéticos, onde a sua composição não pode ser alterada, claraboias e torres.

Com a definição da composição da área, a partir da imagem de satélite, foi possível quantificar a parcela de cada superfície. Este processo foi realizado com o auxílio do *software* AutoCad, para onde a imagem obtida no Google Earth foi exportado e posteriormente escalonada de forma que se tornasse representativo da realidade da área em questão. Cada superfície composta pelas classificações acima citadas foi delimitada por polígonos envoltórios de cores diferentes. A vegetação foi envolvida por um polígono de cor azul escuro, as coberturas das edificações com cor rosa, os pavimentos com a cor verde e por fim, as áreas denominadas inalteráveis receberam a cor azul claro, conforme pode ser visto nas figuras 17 e 18.

Figura 17 – Composição da área do Shopping Bourbon Country



(fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2012)

Figura 18 – Composição da área do Shopping Iguatemi Porto Alegre



(fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2012)

Após a identificação das composições que fazem parte da área em estudo, tornou-se possível quantificar as áreas e determinar quanto estas representam proporcionalmente do total, conforme apresentado na tabela 11.

Tabela 11 – Quantificação e percentual da composição das áreas

IGUATEMI PORTO ALEGRE			BOURBON COUNTRY		
Ocupação	Área	Percentual	Ocupação	Área	Percentual
Pavimentos	55.323,04 m <sup>2</sup>	59,02%	Pavimentos	14.745,39 m <sup>2</sup>	36,41%
Coberturas	32.211,95 m <sup>2</sup>	34,36%	Coberturas	22.587,99 m <sup>2</sup>	55,77%
Vegetação	3.034,04 m <sup>2</sup>	3,24%	Vegetação	1.400,11 m <sup>2</sup>	3,46%
Inalteráveis	3.168,30 m <sup>2</sup>	3,38%	Inalteráveis	1.766,44 m <sup>2</sup>	4,36%
Área total	93.737,33 m <sup>2</sup>		Área total	40.499,93 m <sup>2</sup>	

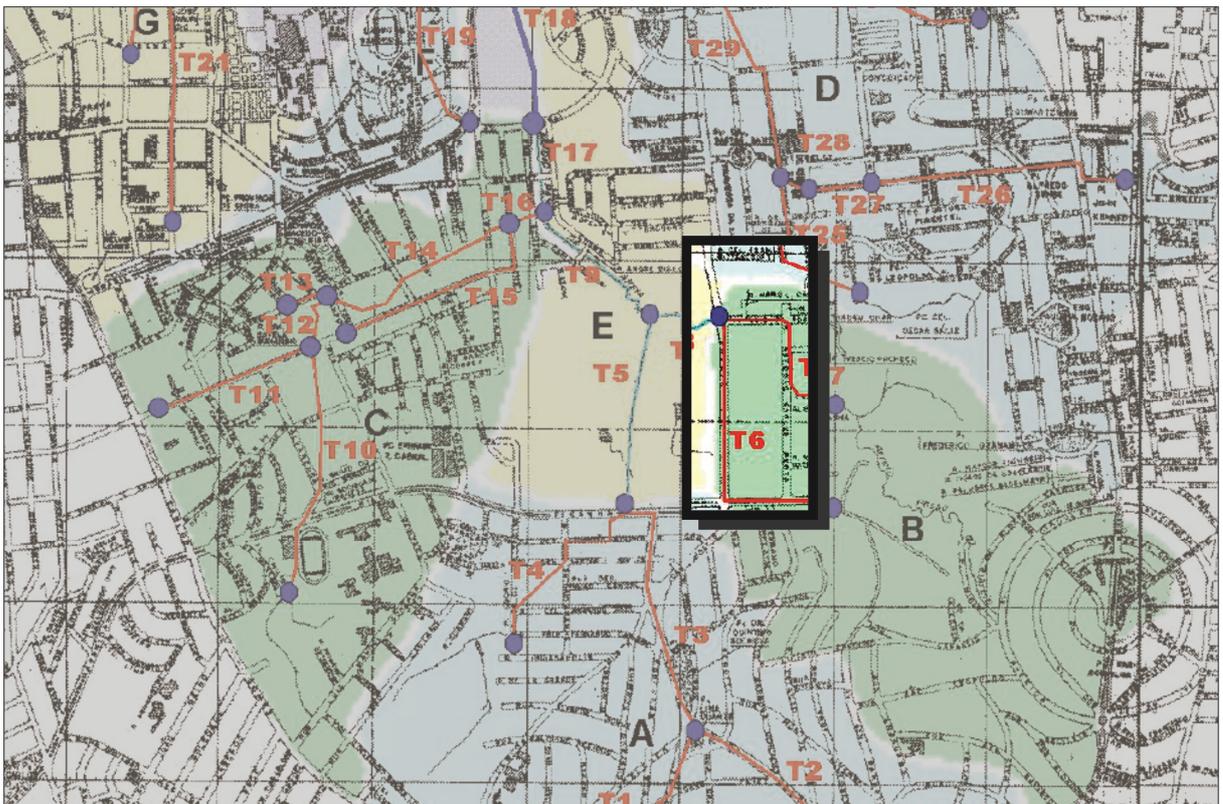
TOTAL			
Ocupação	Área		Percentual
Pavimentos	70.068,43 m <sup>2</sup>		52,20%
Coberturas	54.799,94 m <sup>2</sup>		40,82%
Vegetação	4.434,14 m <sup>2</sup>		3,30%
Inalteráveis	4.934,74 m <sup>2</sup>		3,68%
Área total	134.237,00 m <sup>2</sup>		

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando os dados apresentados na tabela 11, pode-se perceber que as áreas atualmente impermeáveis e que são passíveis da aplicação de dispositivos de controle pluvial, coberturas e pavimentos, representam mais de 90% do total da área estudada, o que viabiliza e indica a utilização dos mesmos.

Para a correta simulação, cada uma das áreas deverá ter seus parâmetros e características analisadas isoladamente, pois de acordo com o PDDrU da Bacia do Arroio Areia (PORTO ALEGRE, 2002), na qual está compreendida a área estudada, a rede de macrodrenagem localiza-se sob a rua que divide a área do Shopping Bourbon Country e Iguatemi Porto Alegre, na Rua Túlio de Rose, conforme figura 19, de forma que cada uma das áreas será definida como uma bacia isolada, e essas duas bacias, cada uma com as suas características e com seu consequente hidrograma, por fim, terá como destino o mesmo ponto, gerando um hidrograma resultante da soma dos hidrogramas das duas áreas.

Figura 19 – Rede de macrodrenagem do Arroio Areia



(fonte: adaptado de PORTO ALEGRE, 2002, p. 3)

### 5.1.3 Hietograma de projeto

O hietograma de projeto representa a sequencia temporal de precipitações às quais será submetida cada uma das bacias em questão, e a partir desta serão determinadas os volumes e vazões escoados superficialmente.

A precipitação foi calculada através da equação IDF presente no PDDrU de Porto Alegre (2005), conforme consta no referido, sendo definida a partir dos dados do pluviografo localizado Posto Aeroporto, dada a sua proximidade com a bacia em análise, respeitando a seguinte equação:

$$i = \frac{826,8 \times T^{0,143}}{(t + 13,3)^{0,79}} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

i = intensidade de chuva (mm/h);

T = período de retorno (anos);

t = duração da chuva (min).

A partir disto, como a análise é feita sobre o efeito da utilização dos dispositivos de controle pluvial sobre a rede de macrodrenagem da cidade e a área em questão trata-se de uma área comercial, de acordo com a tabela 3, o tempo de retorno a ser utilizado é de 10 anos e a duração da chuva de projeto escolhida foi de 60 minutos, espaçadas de um em um minuto. A precipitação calculada pode ser vista na tabela 12. O hietograma de projeto foi obtido a partir do Método dos Blocos Alternados, como já fora explicado anteriormente, este se trata de um método geral e que depende do projetista, de modo a criar um cenário crítico de precipitação. Para este trabalho, o valor de pico foi posicionado na metade do tempo de duração da chuva, figura 20.

Tabela 12 – Chuva de projeto

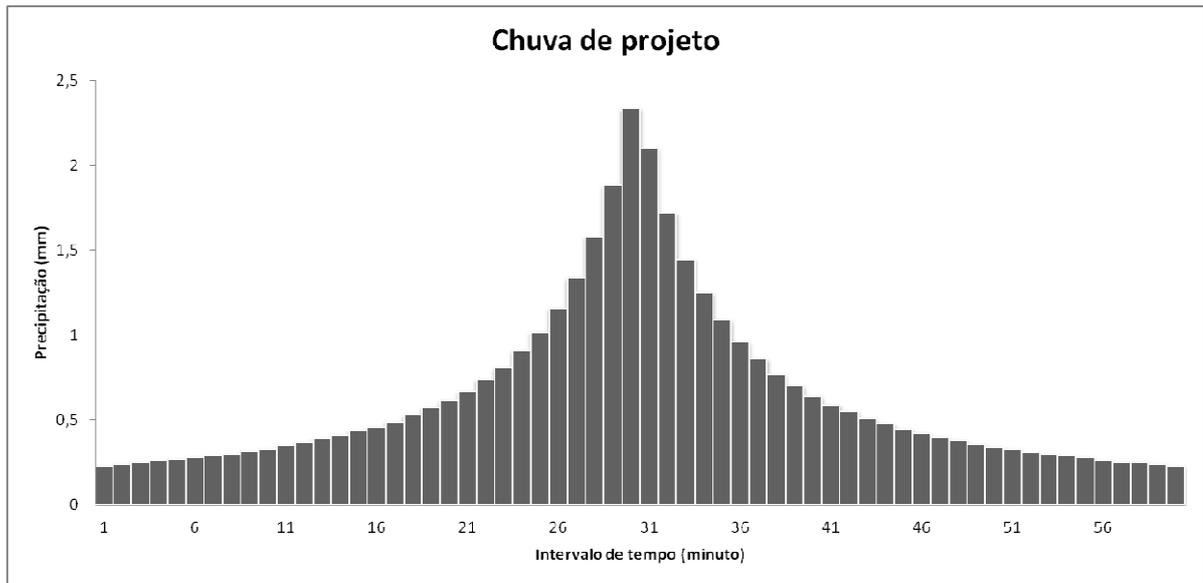
t	I	P <sub>acumulado</sub>	P <sub>desacumulado</sub>	t	I	P <sub>acumulado</sub>	P <sub>desacumulado</sub>
min	mm/h	mm	mm	min	mm/h	mm	mm
1	140,50	2,34	2,34	31	57,51	29,71	0,44
2	133,20	4,44	2,10	32	56,50	30,14	0,42
3	126,70	6,33	1,90	33	55,54	30,55	0,41
4	120,88	8,06	1,72	34	54,61	30,94	0,40
5	115,63	9,64	1,58	35	53,71	31,33	0,39
6	110,87	11,09	1,45	36	52,85	31,71	0,38
7	106,53	12,43	1,34	37	52,02	32,08	0,37
8	102,56	13,67	1,25	38	51,22	32,44	0,36
9	98,91	14,84	1,16	39	50,44	32,79	0,35
10	95,54	15,92	1,09	40	49,69	33,13	0,34
11	92,42	16,94	1,02	41	48,97	33,46	0,33
12	89,52	17,90	0,96	42	48,27	33,79	0,33
13	86,82	18,81	0,91	43	47,59	34,10	0,32
14	84,30	19,67	0,86	44	46,93	34,42	0,31
15	81,94	20,48	0,81	45	46,29	34,72	0,30
16	79,72	21,26	0,77	46	45,68	35,02	0,30
17	77,64	22,00	0,74	47	45,08	35,31	0,29
18	75,67	22,70	0,70	48	44,49	35,60	0,29
19	73,81	23,37	0,67	49	43,93	35,88	0,28
20	72,06	24,02	0,64	50	43,38	36,15	0,27
21	70,39	24,64	0,62	51	42,85	36,42	0,27
22	68,81	25,23	0,59	52	42,33	36,68	0,26
23	67,31	25,80	0,57	53	41,82	36,94	0,26
24	65,88	26,35	0,55	54	41,33	37,20	0,25
25	64,52	26,88	0,53	55	40,85	37,45	0,25
26	63,22	27,39	0,51	56	40,39	37,69	0,25
27	61,97	27,89	0,49	57	39,93	37,93	0,24
28	60,79	28,37	0,48	58	39,49	38,17	0,24
29	59,65	28,83	0,46	59	39,06	38,40	0,23
30	58,56	29,28	0,45	60	38,63	38,63	0,23

(fonte: elaborado pelo autor)

#### 5.1.4 Valores do coeficiente CN

Em função do método utilizado para estimativa da precipitação efetiva deve ser definido o valor do coeficiente CN para as medidas de controle implementadas. Devido às incertezas sobre a capacidade de amortecimento destes dispositivos em função de diferentes variáveis, como por exemplo, precipitação antecedente, condição antecedente de umidade do solo, estado de manutenção do dispositivo, idade do dispositivo, um conjunto de cenários foi simulado utilizando diferentes valores de CN que tentam refletir essas condições.

Figura 20 – Chuva de projeto reordenada pelo Método dos Blocos Alternados



(fonte: elaborado pelo autor)

Os valores adotados do coeficiente CN foram de 75, 80, 85 e 90, sendo que o valor de 75 representaria um dispositivo na sua condição ideal com substrato seco, e o valor de 90 um dispositivo com a vida útil próximo de seu fim, com substrato já saturado, esta classificação pode ser vista nas tabelas 13 e 14, para telhados verdes e pavimentos permeáveis respectivamente. É importante ressaltar que estas hipóteses deveriam ser verificadas com estudos experimentais utilizando estes dispositivos em condições diferentes às de projeto.

Tabela 13 – Valores de CN em função da condição do telhado verde

CN	Situação do dispositivo telhado verde
75	Dispositivo novo (recém instalado), baixa umidade inicial, relevo plano, substrato grosso (maior que 150 mm), manutenção periódica, condição ideal
80	Dispositivo novo (idade baixa), umidade inicial relativamente baixa, relevo com baixa declividade, substrato médio (entre 50 mm e 150mm), manutenção periódica
85	Dispositivo relativamente velho (idade acima da metade da vida útil), solo parcialmente saturado, média declividade, substrato fino (menor que 50 mm), baixa manutenção
90	Dispositivo velho (idade próximo do final da vida útil), solo saturado inicialmente, alta declividade, sem manutenção

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 14 – Valores de CN em função da condição do pavimento permeável

CN	Situação do dispositivo pavimento permeável
75	Presença de vegetação em condição ideal, substrato sem umidade inicial, condição antecedente favorável, sem inclinação do telhado, manutenção periódica
80	Presença de vegetação em bom estado, substrato parcialmente saturado, baixa inclinação do telhado, manutenção periódica
85	Presença de vegetação em mau estado, substrato saturado, baixa inclinação do telhado, manutenção periódica
90	Presença de vegetação em mau estado, substrato completamente saturado, condição antecedente desfavorável, alta inclinação do telhado, sem manutenção periódica

(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.1.5 Área de implantação dos dispositivos

Outro parâmetro importante a ser considerado é a área na qual é passível a instalação dos dispositivos de controle pluvial. A situação ideal seria que todos os espaços compostos por coberturas de edifícios e pavimentos pudessem ser transformadas em telhados verdes e pavimentos permeáveis respectivamente. No entanto, sabe-se que isto nem sempre é possível, levando em conta limitações técnicas construtivas e por vezes estéticas.

Na área estudada, tomou-se o cuidado de considerar a presença de alguns componentes que não poderiam ser alterados, por questões arquitetônicas. Dessa forma levaram-se em conta quatro valores possíveis de implantação para cada dispositivo isoladamente, e por fim a interação dos dispositivos nas duas áreas. Assim, considerou-se que para o Shopping Iguatemi Porto Alegre e Bourbon Country a área passível de alteração representasse 25%, 50%, 75% e 100% da área total composta por coberturas e pavimentos.

## 5.2 CENÁRIOS HIPOTÉTICOS ESTUDADOS

Foram definidos três cenários hipotéticos para análises:

- a) situação atual, sem implantação de medidas de controle;
- b) implantação de apenas uma das medidas de controle avaliada;
- c) implantação das duas medidas de controle avaliadas.

Para os fins de cálculo da situação atual foram utilizados os valores do coeficiente CN apresentados anteriormente na tabela 4, que podem ser vistos resumidamente na 15.

Tabela 15 – Valor de CN para a ocupação inicial

CN	Ocupação
98	Cobertura de edificação impermeabilizada
98	Pavimento de estacionamento e passeio impermeabilizado
60	Vegetação
98	Inalteráveis: áreas impermeáveis que não são passíveis da utilização dos dispositivos

(fonte: elaborado pelo autor)

Inicialmente criou-se a hipótese da utilização apenas de pavimentos permeáveis como solução, para este, foram atribuído valor de CN igual a 75 e considerado a área de implantação do mesmo de 25%, 50%, 75% e 100% da área total, o mesmo foi realizado para os valores de CN 80, 85 e 90. Posteriormente foi realizado o mesmo processo, simulando apenas a utilização de telhados verdes como recurso de drenagem. E por fim, realizou-se o mesmo processo para a interação dos dispositivos. Para facilitar a compreensão das etapas realizadas, foram denominadas de Situação 1 a utilização apenas do pavimento permeável, Situação 2 a utilização do telhado verde e de Situação 3 a interação dos dois dispositivos.

Para a situação atual e para cada situação com implantação de medidas de controle simulada foi utilizado a fórmula 3, apresentada anteriormente, para a determinação de um CN ponderado de cada uma das bacias. Os valores obtidos para a situação atual são apresentados na tabela 16 e para cada uma das situações simuladas nas tabelas 17 a 19.

Tabela 16 – Área e CN ponderado para a situação inicial

Condição Inicial				
CN ponderado		% Área impermeável		
CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
96,77	96,69	96,70%	96,54%	96,76%

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 17 – Área e CN ponderado para a Situação 1

CN Telhado Verde		CN ponderado		% Área impermeável		
75		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	93,38	94,59	86,49%	87,44%	82,01%
	50%	89,98	92,50	76,29%	78,34%	67,25%
	75%	86,59	90,41	66,08%	69,24%	52,50%
	100%	83,20	88,31	55,87%	60,13%	37,74%
CN Telhado Verde		CN ponderado		% Área impermeável		
80		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	94,11	95,05	86,49%	87,44%	82,01%
	50%	91,46	93,41	76,29%	78,34%	67,25%
	75%	88,80	91,77	66,08%	69,24%	52,50%
	100%	86,15	90,13	55,87%	60,13%	37,74%
CN Telhado Verde		CN ponderado		% Área impermeável		
85		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	94,85	95,50	86,49%	87,44%	82,01%
	50%	92,93	94,32	76,29%	78,34%	67,25%
	75%	91,02	93,14	66,08%	69,24%	52,50%
	100%	89,10	91,95	55,87%	60,13%	37,74%
CN Telhado Verde		CN ponderado		% Área impermeável		
90		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	95,59	95,96	86,49%	87,44%	82,01%
	50%	94,41	95,23	76,29%	78,34%	67,25%
	75%	93,23	94,50	66,08%	69,24%	52,50%
	100%	92,05	93,77	55,87%	60,13%	37,74%

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 18 – Área e CN ponderado para a Situação 2

CN Pavimento Permeável	75	CN ponderado		% Área impermeável		
		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	94,79	93,48	83,65%	82,60%	88,17%
	50%	92,82	90,27	70,60%	68,66%	79,58%
	75%	90,84	87,07	57,55%	54,71%	70,99%
	100%	88,87	83,86	44,50%	40,77%	62,40%

CN Pavimento Permeável	75	CN ponderado		% Área impermeável		
		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	95,22	94,18	83,65%	82,60%	88,17%
	50%	93,68	91,67	70,60%	68,66%	79,58%
	75%	92,13	89,16	57,55%	54,71%	70,99%
	100%	90,58	86,65	44,50%	40,77%	62,40%

CN Pavimento Permeável	75	CN ponderado		% Área impermeável		
		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	95,65	94,87	83,65%	82,60%	88,17%
	50%	94,54	93,06	70,60%	68,66%	79,58%
	75%	93,42	91,25	57,55%	54,71%	70,99%
	100%	92,30	89,44	44,50%	40,77%	62,40%

CN Pavimento Permeável	75	CN ponderado		% Área impermeável		
		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	96,08	95,57	83,65%	82,60%	88,17%
	50%	95,40	94,46	70,60%	68,66%	79,58%
	75%	94,71	93,34	57,55%	54,71%	70,99%
	100%	94,02	92,22	44,50%	40,77%	62,40%

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 19 – Área e CN ponderado para a Situação 3

CN Interação		CN ponderado		% Área impermeável		
75		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	91,40	91,39	83,65%	73,50%	73,42%
	50%	86,03	86,09	70,60%	50,45%	50,07%
	75%	80,66	80,79	57,55%	27,41%	26,73%
	100%	75,29	75,48	44,50%	4,36%	3,38%

CN Interação		CN ponderado		% Área impermeável		
80		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	92,57	92,54	83,65%	73,50%	73,42%
	50%	88,37	88,39	70,60%	50,45%	50,07%
	75%	84,16	84,24	57,55%	27,41%	26,73%
	100%	79,96	80,09	44,50%	4,36%	3,38%

CN Interação		CN ponderado		% Área impermeável		
85		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	93,74	93,69	83,65%	73,50%	73,42%
	50%	90,70	90,69	70,60%	50,45%	50,07%
	75%	87,67	87,70	57,55%	27,41%	26,73%
	100%	84,63	84,70	44,50%	4,36%	3,38%

CN Interação		CN ponderado		% Área impermeável		
90		CN Iguatemi	CN Bourbon	Total	Bourbon	Iguatemi
Área implantada	25%	94,90	94,84	83,65%	73,50%	73,42%
	50%	93,03	93,00	70,60%	50,45%	50,07%
	75%	91,17	91,16	57,55%	27,41%	26,73%
	100%	89,30	89,31	44,50%	4,36%	3,38%

(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3 MODELAGEM CHUVA-VAZÃO

Após a definição e caracterização dos parâmetros e variáveis relevantes para a execução do trabalho, iniciou-se a etapa de desenvolvimento do modelo. Nesta seção é descrito o procedimento utilizado no processo de transformação da precipitação em vazão para posterior desenvolvimento dos gráficos e tabelas com os resultados deste trabalho.

A transformação do hietograma de projeto definido anteriormente no hidrograma de projeto foi executada com o auxílio do *software* IPHS1, apresentado no capítulo 3. Para realizar este processo, os dados de entrada utilizados foram as informações e características de cada uma das bacias e o evento chuva. Para a estimativa da precipitação efetiva foi utilizado o método do coeficiente CN do SCS. Por sua vez, na transformação da precipitação efetiva em vazão foi utilizado o método do hidrograma unitário sintético também do SCS. O escoamento

superficial gerado varia basicamente em função do valor de CN a ser utilizado, este valor por sua vez, varia de acordo com o funcionamento e com a área de implantação do dispositivo, como visto anteriormente.

## 6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através de gráficos e tabelas resultantes da aplicação do modelo desenvolvido e referido no capítulo anterior nos diferentes cenários hipotéticos avaliados. O capítulo é dividido em quatro seções que demonstram os resultados obtidos através de gráficos e a tabelas de cada um dos parâmetros para as situações estudadas. No final do capítulo são mostradas tabelas resumos com todos os parâmetros para cada uma das situações pré-definidas.

Para cada uma das combinações aplicadas neste trabalho, são analisadas a vazão de pico do escoamento superficial, o volume de água escoado superficialmente, o coeficiente de escoamento superficial obtido e por fim o tempo de resposta da bacia em questão.

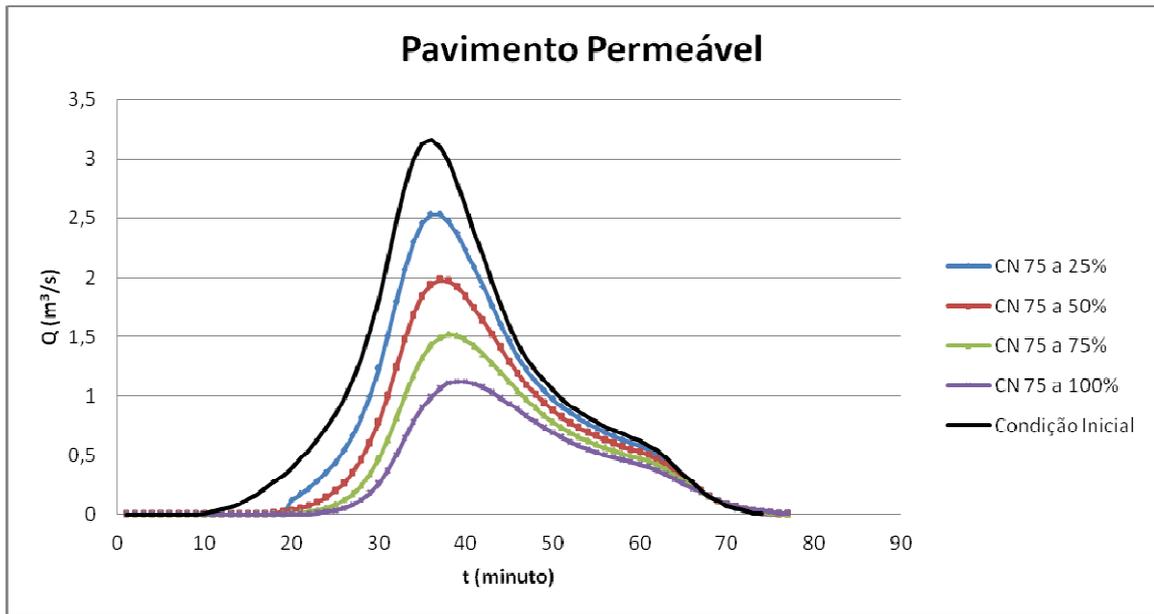
### 6.1 VAZÃO DE PICO

Nesta seção são apresentados os valores de vazão de pico para as situações estudadas, comparando-os com a condição inicial. São apresentados os resultados para os valores de CN extremos, os demais gráficos podem ser visualizados no apêndice A. Nas figuras 21 a 24 podem ser vistos os resultados obtidos para CN 75 e 90.

Os valores obtidos para a vazão de pico com a utilização do telhado verde não são exibidos, pois apresentam valores similares aos da utilização do pavimento permeável em função da metodologia utilizada na execução deste trabalho, tendo em vista que a área destinada para este se aproxima a do pavimento permeável. Os resultados obtidos para a utilização do telhado verde juntamente com os demais valores de CN podem ser vistos no apêndice A.

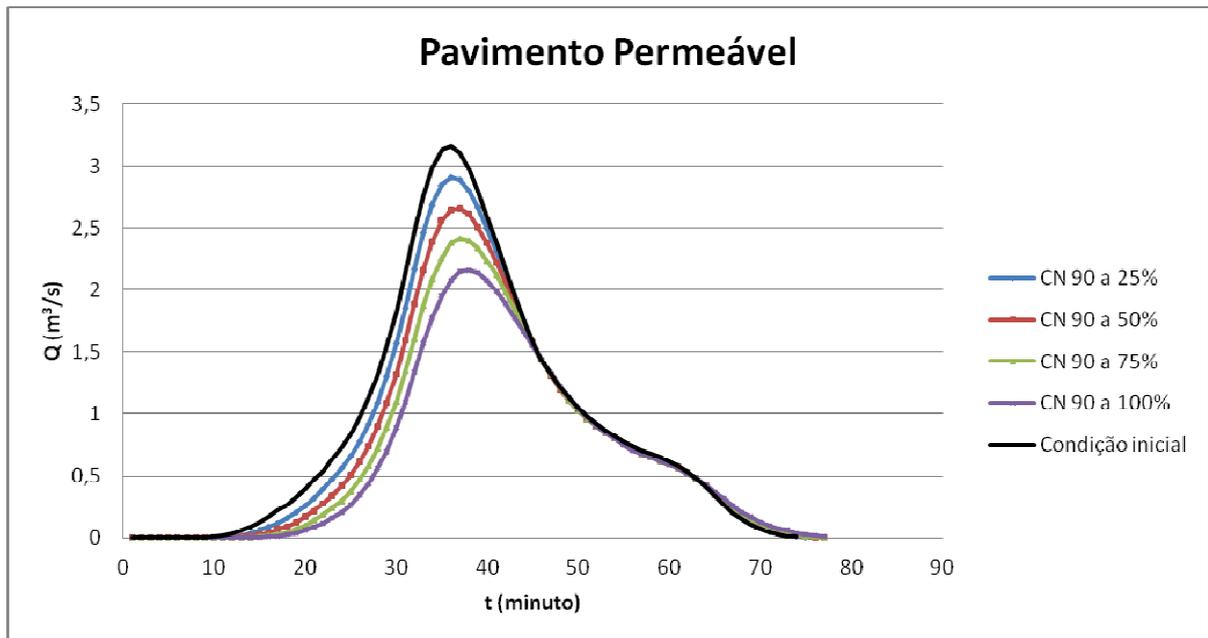
O ideal seria que a aplicação dos dispositivos fosse realizada em toda a área, mas verificando os gráficos, pode-se visualizar que mesmo a taxas menores de implantação, como 50% e 75%, os valores de pico caem significativamente, indicando a sua utilização mesmo quando não podem ser aplicadas na totalidade.

Figura 21 – Vazão de pico para pavimento permeável e CN 75



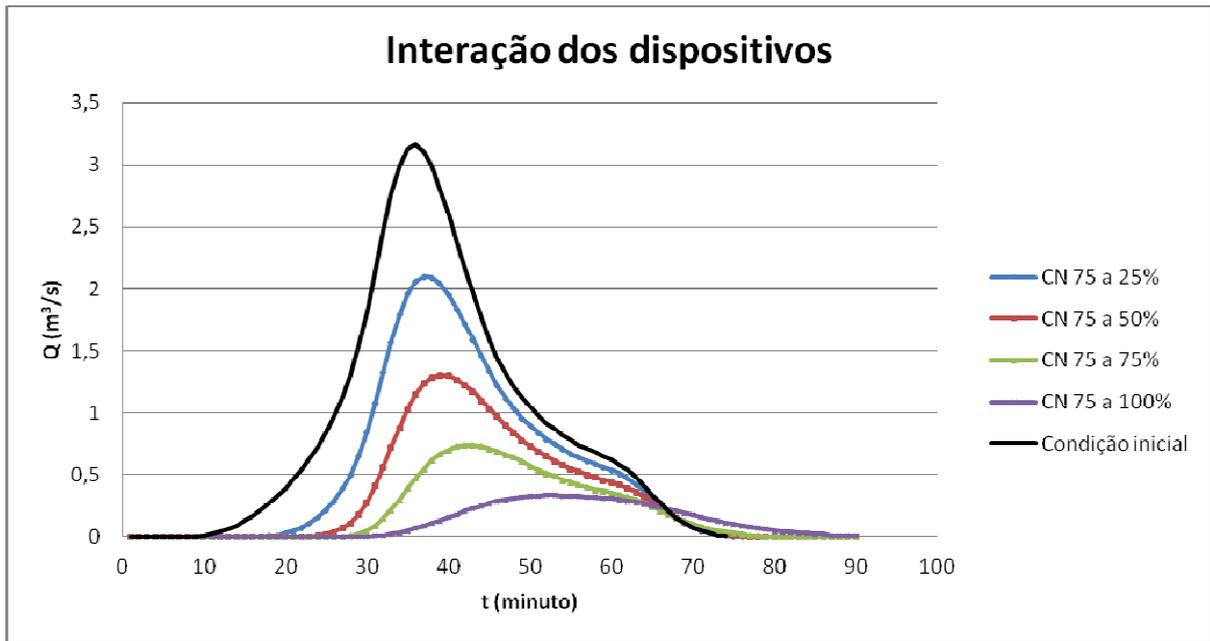
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22 – Vazão de pico para pavimento permeável e CN 90



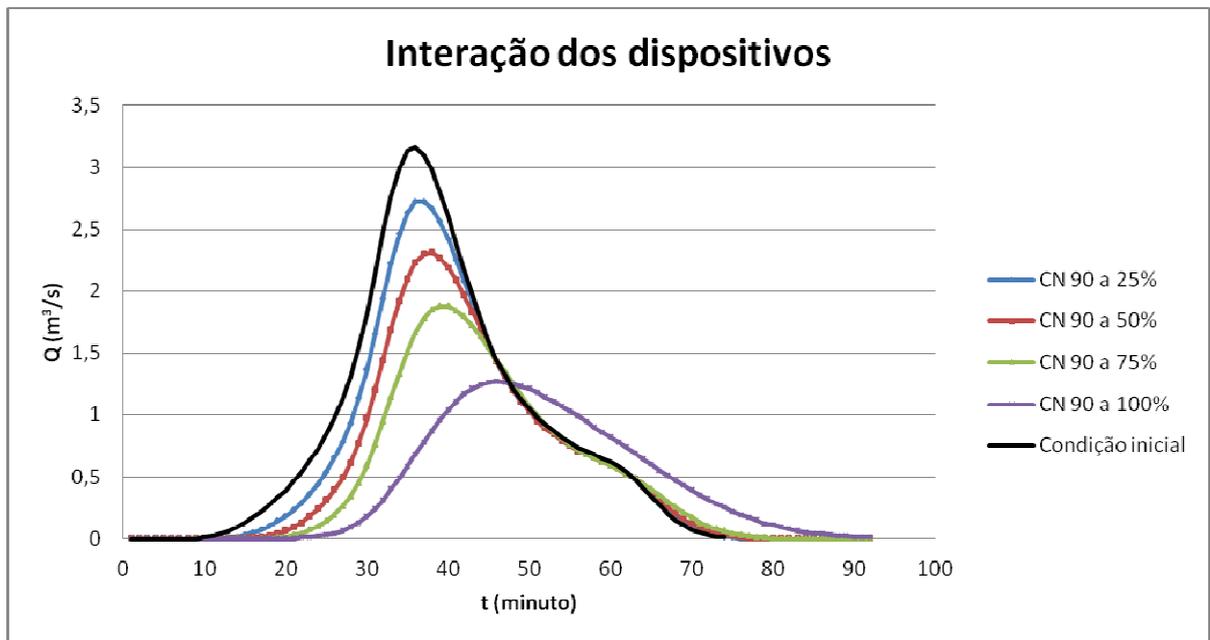
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 23 – Vazão de pico para interação dos dispositivos e CN 75



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 – Vazão de pico para interação dos dispositivos e CN 90



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando comparativamente a condição inicial da área estudada, a vazão de pico cai 52% com a utilização pavimento permeável considerando CN 75 aplicado em 75% da área passível, e 23% para CN 90 em 75% da área passível.

Para a interação dos dispositivos aplicados a 75% da área total possível de aplicação, a vazão de pico considerando CN 75 é reduzida a 23% da inicial observada e para um CN 90 ela é reduzida a 59% da inicial.

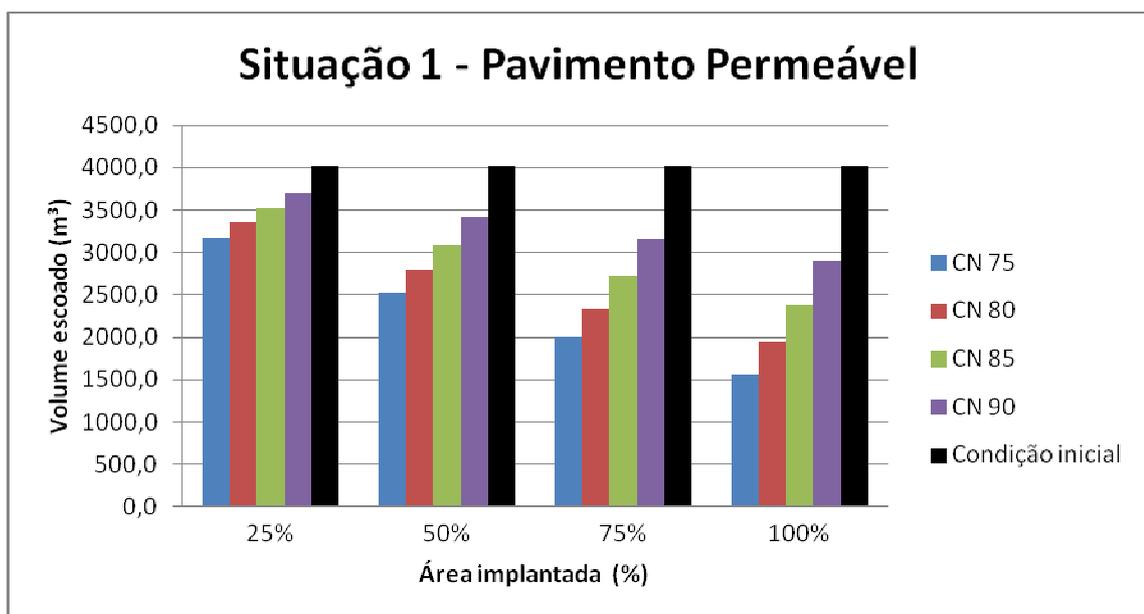
Analisando os resultados obtidos, também pode-se visualizar que a interação dos dispositivos apresenta valores significativos de redução da vazão de pico. Tanto que na condição ideal considerada nesse trabalho, CN 75 a 100%, o escoamento superficial chega próximo à zero.

## 6.2 VOLUME ESCOADO

Nesta seção são apresentados os volumes escoados superficialmente para as situações estudadas, comparando-os com o da condição inicial, conforme apresentado na figura 25 à figura 27. O volume escoado é representado e calculado como a área abaixo do hidrograma de projeto para cada caso.

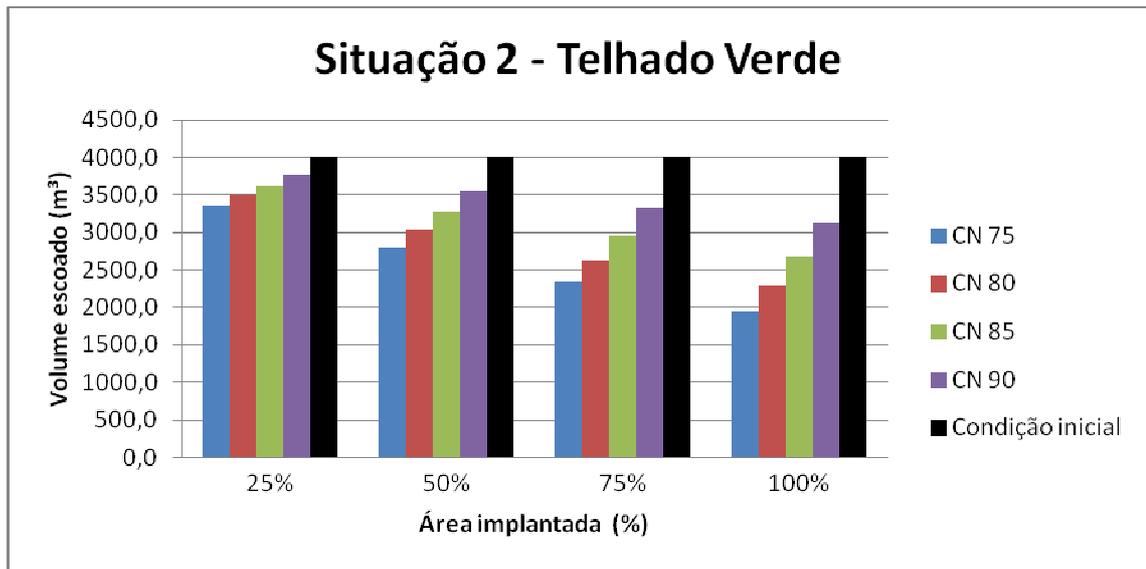
O volume escoado diminui de forma acentuada com a utilização dos dispositivos, principalmente quando estes são combinados, podendo ser reduzido em aproximadamente 86% para uma condição ideal de CN e de área implantada.

Figura 25 – Volume escoado para pavimento permeável



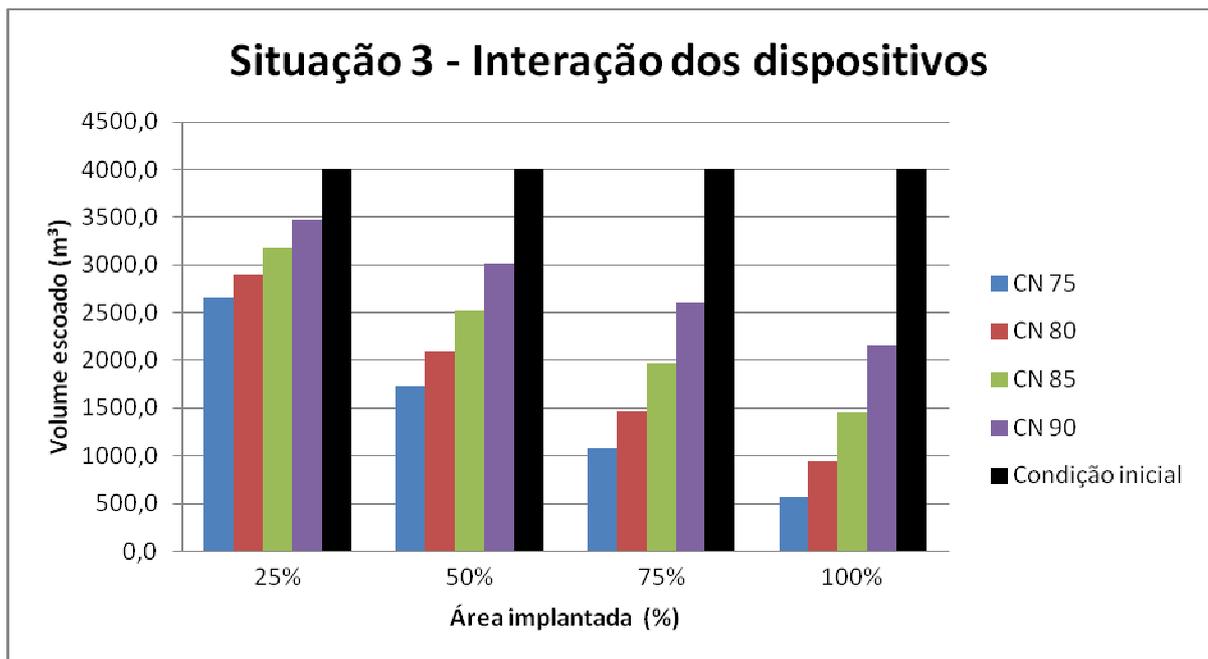
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Volume escoado para telhado verde



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Volume escoado para a interação dos dispositivos



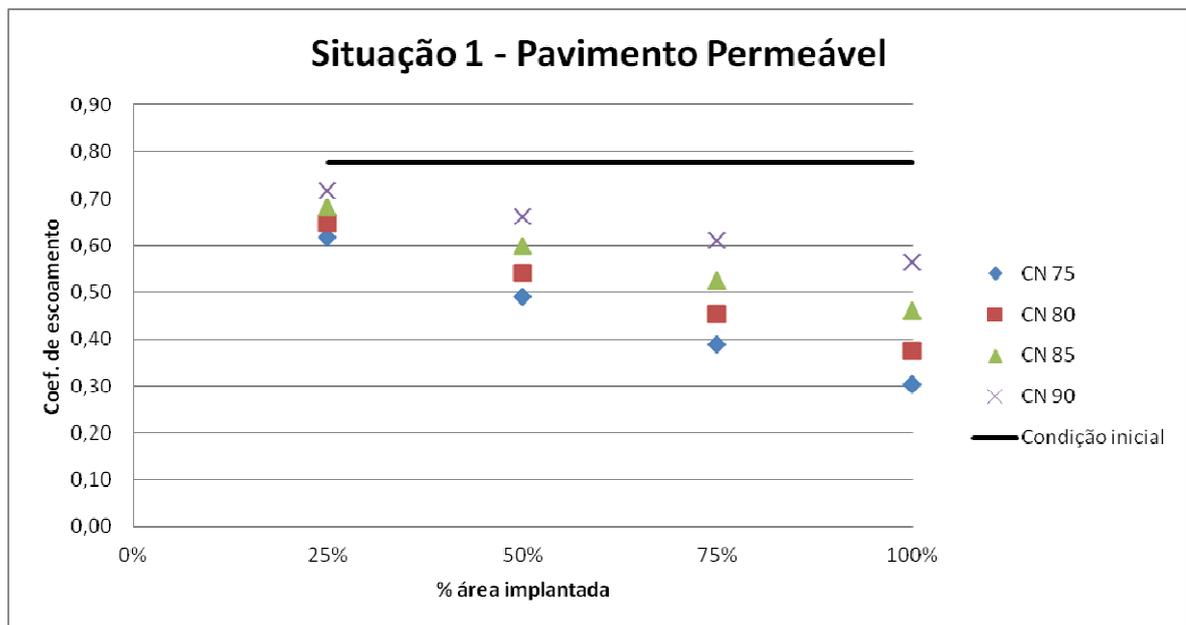
(fonte: elaborado pelo autor)

Com base nos resultados, também pode-se perceber que para um menor valor de área implantada, o volume escoado não difere muito em função do CN, à medida que a área implantada aumenta, o volume passa a reduzir de forma significativa. Desta forma, pode-se concluir que os volumes escoados reduzem consideravelmente à medida que aumenta a área implantada se mantidos um mesmo valor de CN.

### 6.3 COEFICIENTE DE ESCOAMENTO

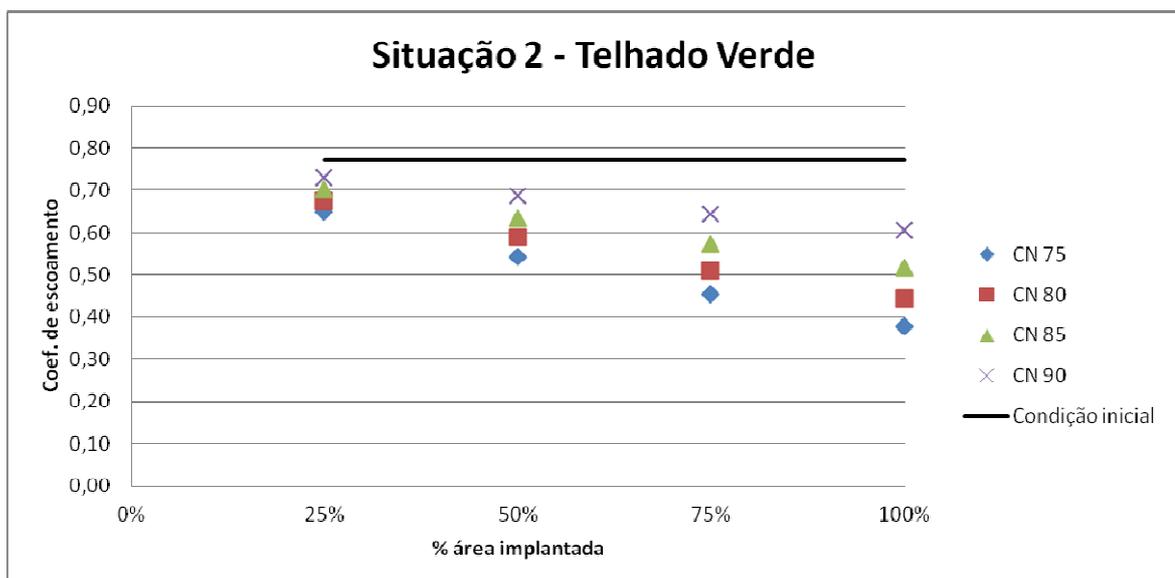
Nesta seção são apresentados os coeficientes de escoamento em função da simulação realizada, comparando-os com a situação inicial (figuras 28 a 30). Este parâmetro é obtido através da razão da precipitação escoada pela total na bacia, e é um dos principais parâmetros de classificação destes dispositivos.

Figura 28 – Coeficiente de escoamento para pavimento permeável



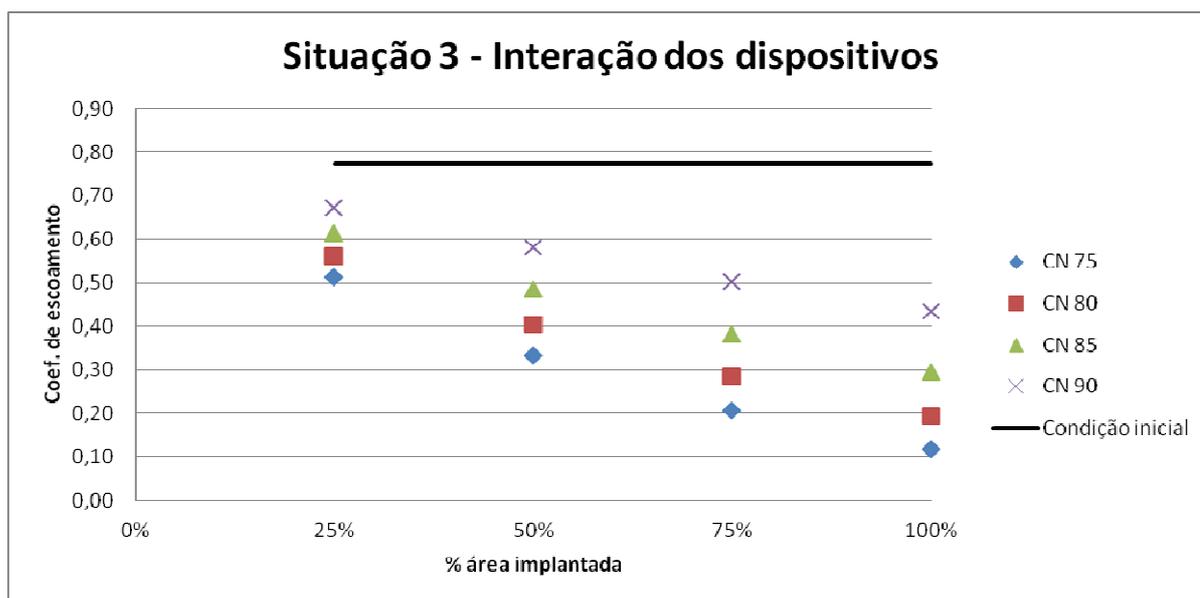
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Coeficiente de escoamento para telhado verde



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 30 – Coeficiente de escoamento para a interação dos dispositivos



(fonte: elaborado pelo autor)

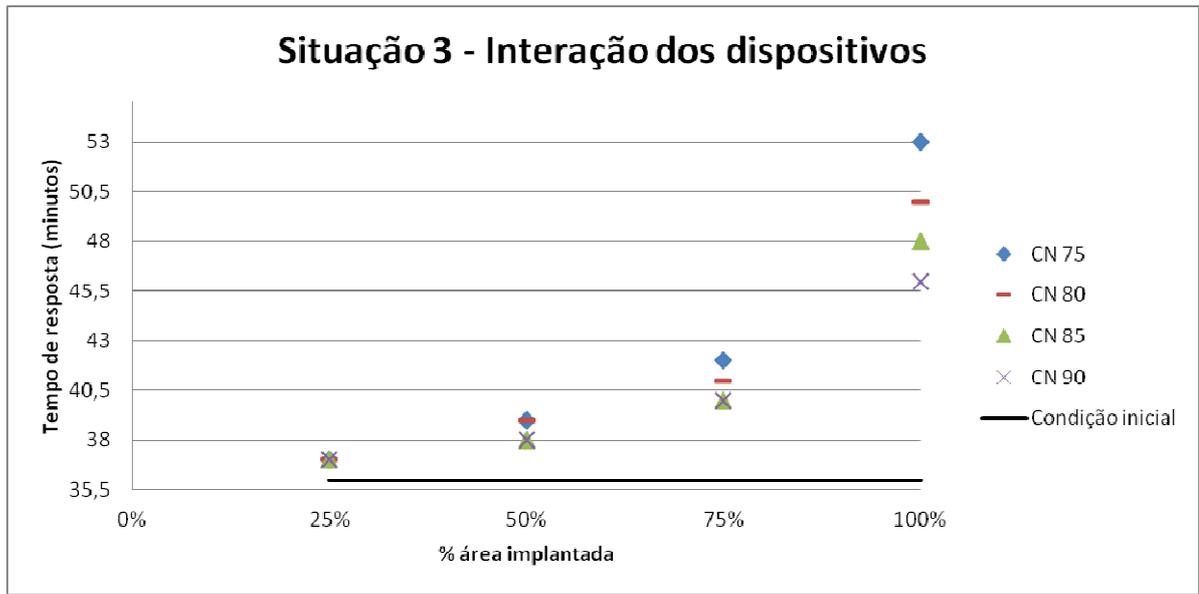
O coeficiente de escoamento para a utilização dos dispositivos isoladamente apresentam valores semelhantes, tanto para o caso de telhados verdes como o caso de pavimentos permeáveis, pelos mesmos motivos citados para a geração da vazão de pico. Analisando os resultados pode-se perceber que os valores obtidos se tornam mais representativos em função do aumento da área implantada, assim como os volumes escoados superficialmente citados na seção anterior, pois à medida que esta área aumenta, começam a absorver as águas precipitadas proporcionalmente a este parâmetro.

Pode-se notar que o coeficiente de escoamento para uma situação ideal reduz em aproximadamente 90% se comparado àquele que seria obtido para a condição inicial, indicando a funcionalidade e a utilização destes dispositivos principalmente de forma conjunta, e de preferência, com a maior área possível para a aplicação, de forma a apresentar resultados mais eficientes.

#### 6.4 TEMPO DE PICO

As alterações no tempo de resposta da bacia são significativas apenas para o caso da interação dos dispositivos e estão apresentados na figura 31. Para o caso da utilização de um dos dispositivos só, os gráficos com os resultados podem ser visualizados no apêndice B.

Figura 31 – Tempo de resposta para a interação dos dispositivos



(fonte: elaborado pelo autor)

Com base no gráfico pode-se perceber que o tempo de resposta da bacia é retardado com significância à medida que aumenta a área de implantação do dispositivo. Podendo retardar o tempo de resposta da bacia, na condição ideal, interação dos dispositivos com CN 75 a 100%, em 17 minutos, o que para um evento chuvoso de 60 minutos é representativo.

## 6.5 RESUMO DOS RESULTADOS

O objetivo desta seção é apresentar de forma resumida os resultados obtidos com a realização deste trabalho. As tabelas 20 a 22 apresentam respectivamente os resultados para a utilização do pavimento permeável, telhado verde e a interação dos dispositivos, podendo ser visualizado todos os resultados para cada situação conjuntamente.

Tabela 20 – Resumo dos resultados obtidos para pavimento permeável

CN	% Área Implantada	Coeficiente de escoamento			Vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)	Instante da vazão de pico (min)	Volume esocado (m <sup>3</sup> )
		Iguatemi	Bourbon	Média Ponderada			
75	25%	0,60	0,66	0,62	2,53	t = 37	3171,6
	50%	0,46	0,56	0,49	1,98	t = 37	2529,6
	75%	0,35	0,47	0,39	1,52	t = 38	2004,6
	100%	0,26	0,40	0,30	1,12	t = 39	1570,8
80	25%	0,63	0,68	0,65	2,65	t = 37	3350,4
	50%	0,52	0,60	0,54	2,20	t = 37	2796,6
	75%	0,42	0,53	0,45	1,79	t = 38	2334,6
	100%	0,34	0,46	0,38	1,42	t = 39	1938,0
85	25%	0,67	0,70	0,68	2,78	t = 36	3520,2
	50%	0,58	0,64	0,60	2,43	t = 37	3091,8
	75%	0,50	0,59	0,53	2,09	t = 37	2720,4
	100%	0,43	0,54	0,46	1,76	t = 38	2383,2
90	25%	0,71	0,73	0,72	2,91	t = 36	3697,8
	50%	0,65	0,69	0,66	2,66	t = 37	3417,0
	75%	0,59	0,65	0,61	2,42	t = 37	3158,4
	100%	0,54	0,62	0,56	2,16	t = 38	2911,8

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 21 – Resumo dos resultados obtidos para telhado verde

Situação 2 - Utilização do Telhado Verde							
CN	% Área Implantada	Coeficiente de escoamento			Vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)	Instante da vazão de pico (min)	Volume esocado (m <sup>3</sup> )
		Iguatemi	Bourbon	Média Ponderada			
75	25%	0,67	0,60	0,65	2,68	t = 36	3352,8
	50%	0,57	0,47	0,54	2,24	t = 37	2803,2
	75%	0,49	0,36	0,45	1,85	t = 38	2343,0
	100%	0,42	0,28	0,38	1,51	t = 39	1949,4
80	25%	0,69	0,64	0,67	2,78	t = 36	3489,0
	50%	0,61	0,52	0,59	2,42	t = 37	3030,0
	75%	0,54	0,43	0,51	2,08	t = 37	2631,6
	100%	0,48	0,35	0,44	1,78	t = 38	2284,8
85	25%	0,71	0,67	0,70	2,88	t = 36	3624,0
	50%	0,65	0,58	0,63	2,60	t = 37	3275,4
	75%	0,60	0,51	0,57	2,34	t = 37	2959,2
	100%	0,55	0,44	0,52	2,08	t = 38	2673,6
90	25%	0,74	0,71	0,73	2,98	t = 36	3769,8
	50%	0,70	0,65	0,68	2,79	t = 37	3539,4
	75%	0,66	0,60	0,64	2,61	t = 37	3328,2
	100%	0,63	0,55	0,60	2,42	t = 37	3122,4

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 22 - Resumo dos resultados obtidos para a interação dos dispositivos

Situação 3 - Interação dos dispositivos							
CN	% Área Implantada	Coeficiente de escoamento			Vazão de pico (m <sup>3</sup> /s)	Instante da vazão de pico (min)	Volume esocado (m <sup>3</sup> )
		Iguatemi	Bourbon	Média Ponderada			
75	25%	0,51	0,51	0,51	2,11	t = 37	2650,8
	50%	0,33	0,34	0,33	1,30	t = 39	1728,0
	75%	0,21	0,21	0,21	0,74	t = 42	1071,0
	100%	0,12	0,12	0,12	0,34	t = 53	569,4
80	25%	0,56	0,56	0,56	2,30	t = 37	2902,2
	50%	0,40	0,40	0,40	1,59	t = 39	2092,2
	75%	0,29	0,29	0,29	1,04	t = 41	1469,4
	100%	0,19	0,20	0,19	0,55	t = 50	945,0
85	25%	0,62	0,61	0,61	2,51	t = 37	3177,6
	50%	0,49	0,49	0,49	1,93	t = 38	2515,2
	75%	0,38	0,38	0,38	1,41	t = 40	1969,2
	100%	0,30	0,30	0,30	0,85	t = 48	1454,4
90	25%	0,67	0,67	0,67	2,72	t = 37	3472,2
	50%	0,58	0,58	0,58	2,31	t = 38	3014,4
	75%	0,50	0,50	0,50	1,88	t = 40	2601,6
	100%	0,44	0,44	0,44	1,27	t = 46	2155,8

(fonte: elaborado pelo autor)

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A intenção deste trabalho foi observar os efeitos quantitativos da utilização de dispositivos de controle pluvial no lote sobre o sistema de drenagem urbano, no que se refere à redução dos volumes escoados superficialmente e pico das vazões. Através do processo de simulação hidrológica foi possível avaliar esses quantitativos para diferentes condições de funcionamento dos dispositivos de controle. Durante a modelagem foi definido um hietograma de projeto baseado na equação IDF existente na região e que representa um evento de chuva crítico sobre a área em questão, definida como uma área comercial urbana do município de Porto Alegre. A partir desse evento de precipitação foi possível analisar a resposta da bacia em termos de vazões superficiais considerando a situação inicial, onde predominam as áreas impermeáveis, e cenários hipotéticos onde as medidas de controle foram implementadas em maior ou menor grau, com maiores e menores eficiência.

A análise foi realizada considerando a utilização de cada dispositivo isoladamente e por fim, a interação destes. Para que os resultados do trabalho fossem representativos das situações reais, duas variáveis foram consideradas, o valor do coeficiente CN e a área de aplicação dos dispositivos.

Os resultados obtidos foram verificados para os parâmetros vazão de pico do escoamento, volume escoado, retardo do tempo de pico e coeficiente de escoamento superficial. Comparando a condição inicial com os cenários hipotéticos criados os valores obtidos para as condições ideais de utilização dos dispositivos foram reduzidos a 15% dos valores iniciais para os parâmetros vazão de pico e volume escoado superficialmente.

Com a execução do trabalho pode-se verificar que mesmo para uma taxa de aplicação inferior a totalidade possível, e para a condição dos dispositivos e de umidade do solo aquém da situação ideal, os resultados obtidos para todos os parâmetros analisados são significativos, representando a importância da utilização dos mesmos com o intuito de mitigar os efeitos causados pela urbanização.

## REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Gestão Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- ARAÚJO, S. R. **As funções dos telhados verdes no meio urbano, na gestão e no planejamento de recursos hídricos**. 2007. 28 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2007.
- ARAÚJO, P. R. de.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 3, p. 21-29, jul./set. 2000.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L. de.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2005.
- BUFFON, F. T. **Aproveitamento de águas pluviais: efeito sobre o sistema de drenagem urbana**. 2010. 59 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- CASTRO, A. S.; ALLASIA, D. G.; ORDOÑEZ, J. S.; GONÇALVES, L. S. **Águas pluviais urbanas: guia da oficina de capacitação**. Porto Alegre: Nudeme, 2008.
- CASTRO, A. S.; GOLDENFUM, J. A. Uso de telhados verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano. **Attitude: construindo oportunidades**, Porto Alegre, v. 4, n. 7, p. 75-81, jan./jun. 2010.
- CECCHIN, M. **Os telhados verdes como alternativas ao meio urbano**. Porto Alegre: [20--?]. Disponível em:  
<[www.faculadadedombosco.edu.br/downloadAnexo.php?ftype=3Dcursos-itens%26id%3D614&ei=fka\\_Tr\\_fKsadgwfk0vyVBQ&usg=AFQjCNG9HCPccT8rXdW69R8z2njXlsIVsw&cad=rja](http://www.faculadadedombosco.edu.br/downloadAnexo.php?ftype=3Dcursos-itens%26id%3D614&ei=fka_Tr_fKsadgwfk0vyVBQ&usg=AFQjCNG9HCPccT8rXdW69R8z2njXlsIVsw&cad=rja)>. Acesso em: 30 out. 2011.
- CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E AGRONOMIA DO RIO GRANDE DO SUL. Telhados verdes: a cobertura ecológica. **Conselho em revista**, Porto Alegre, v. 1, n. 34, p. 28, jun. 2007.
- CUNHA, A. P. S. R. da. **Experimento hidrológico para aproveitamento de águas de chuva usando coberturas verdes leves (CVL)**. São Carlos: USP, 2004.
- FILHO, F. C. M. de M.; COSTA, A. R. da.; Aplicação do método dos blocos alternados e da convolução de hidrogramas para determinação de escoamento superficial direto – ESD. In:

SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORTE E CENTRO OESTE, 2007, Cuiabá. Anais... Cuiabá: ABRH, 2007. p. 1-15. Disponível em: <[http://www.abrh.org.br/novo/i\\_simp\\_rec\\_hidric\\_norte\\_centro\\_oeste24.pdf](http://www.abrh.org.br/novo/i_simp_rec_hidric_norte_centro_oeste24.pdf)>. Acesso em: 18 jun. 2012.

GOOGLE EARTH. [Shopping Iguatemi Porto Alegre]. [S. l.], 2011.

HALL, M. J. **Urban hydrology**. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1984.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População residente, por situação de domicílio e sexo, segundo os grupos de idade**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas\\_da\\_populacao/tabelas\\_pdf/tab1.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas_da_populacao/tabelas_pdf/tab1.pdf)>. Acesso em: 18 abr. 2012.

MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. **Landscape and urban planning**, Leuven, v. 77, n. 3, p. 217-226, Aug. 2006.

PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Departamento de Esgotos Pluviais. **Plano diretor de drenagem urbana: Bacia do Arroio Areia**. Porto Alegre, 2002. v. 4.

\_\_\_\_\_. Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Departamento de Esgotos Pluviais. **Plano diretor de drenagem urbana: manual de drenagem urbana**. Porto Alegre, 2005. v. 6.

ROBERTSON, S. **Stanford University's Green Dorm Water System Management Project**. Stanford: [s. n.], 2005.

SANCHÉZ, J. **Fundamentos de hidrologia**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2008.

TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas, in: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R.; BARROS, M. (Org). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Editora da UFRGS; ABRH, 1995. p. 15-36.

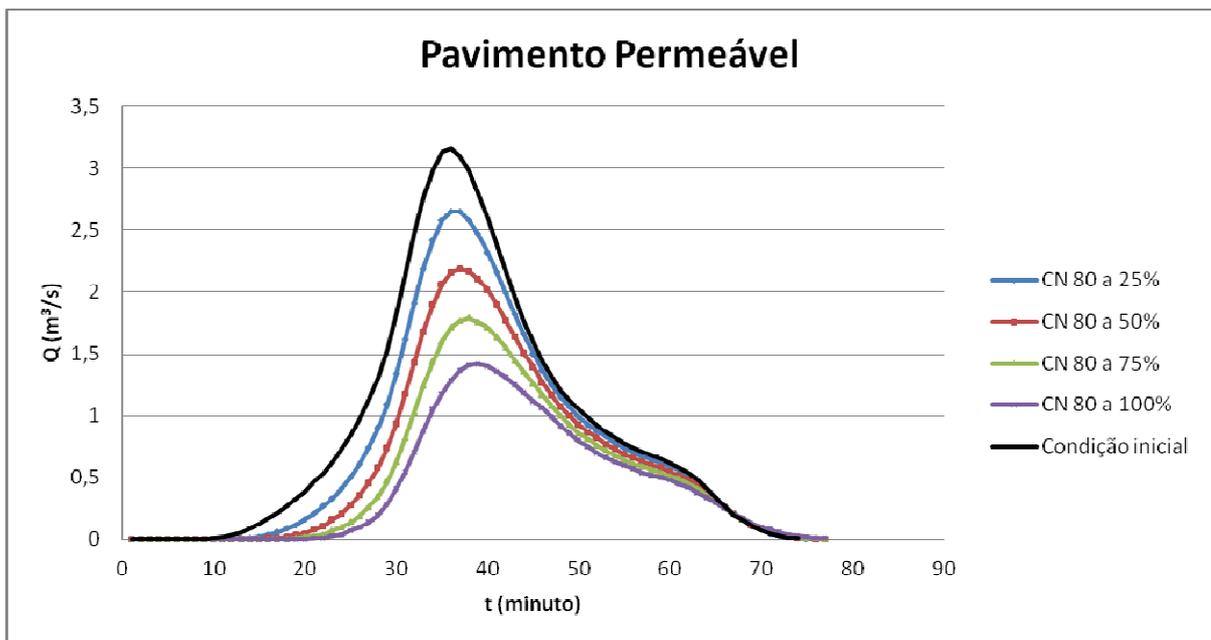
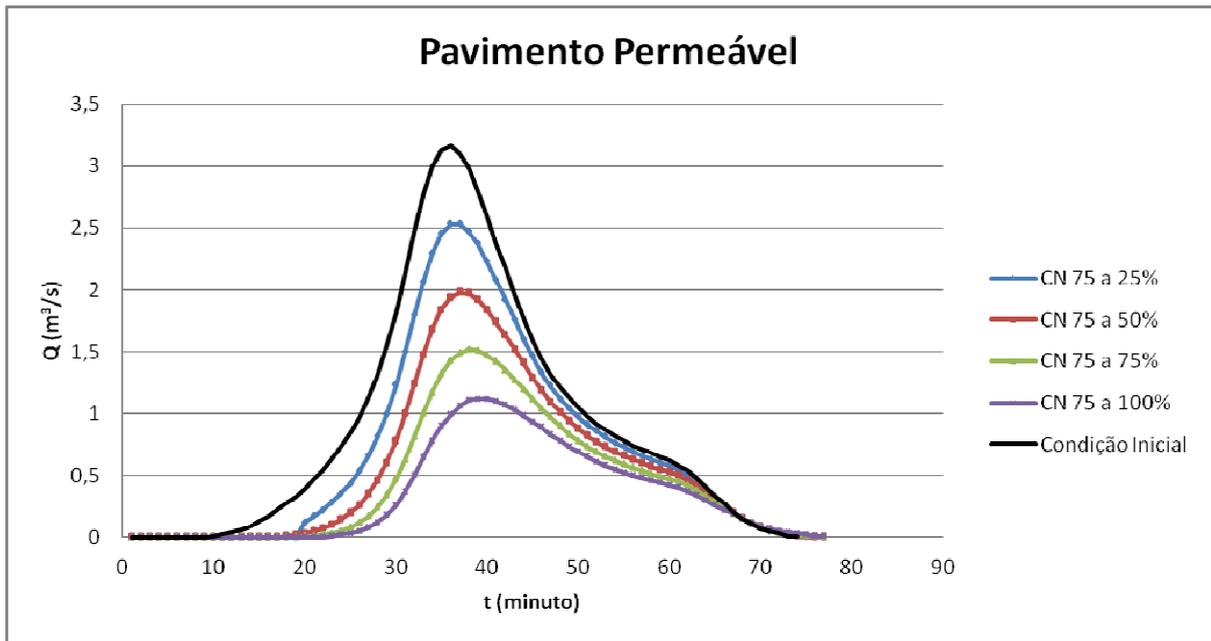
\_\_\_\_\_. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68, jan./mar., 2000.

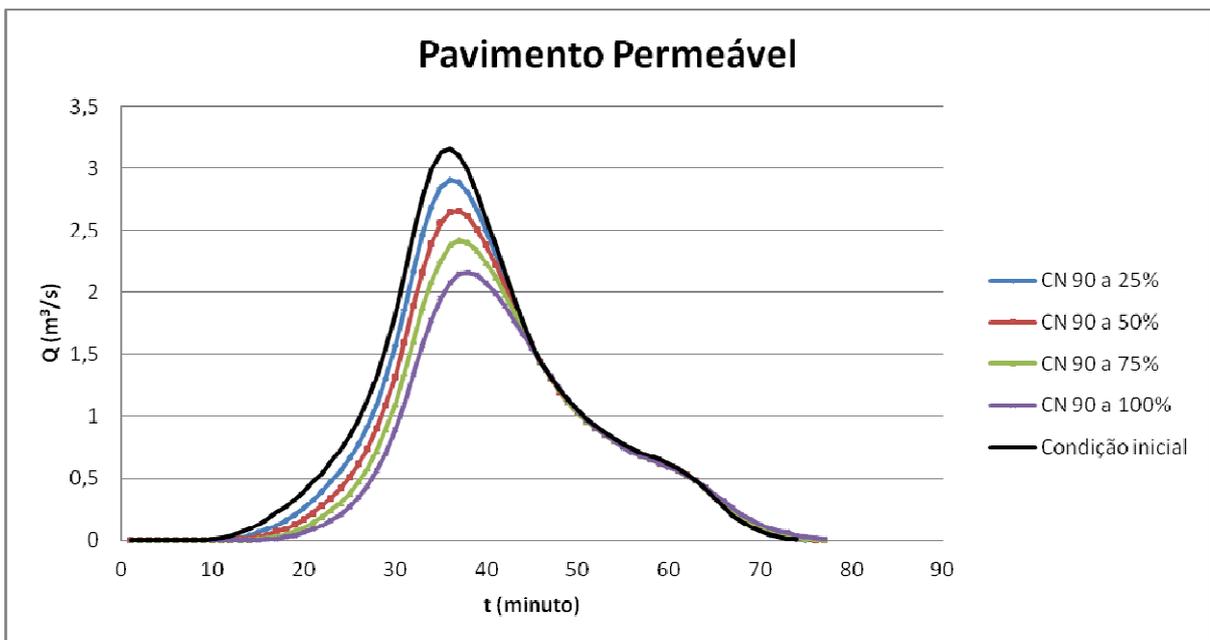
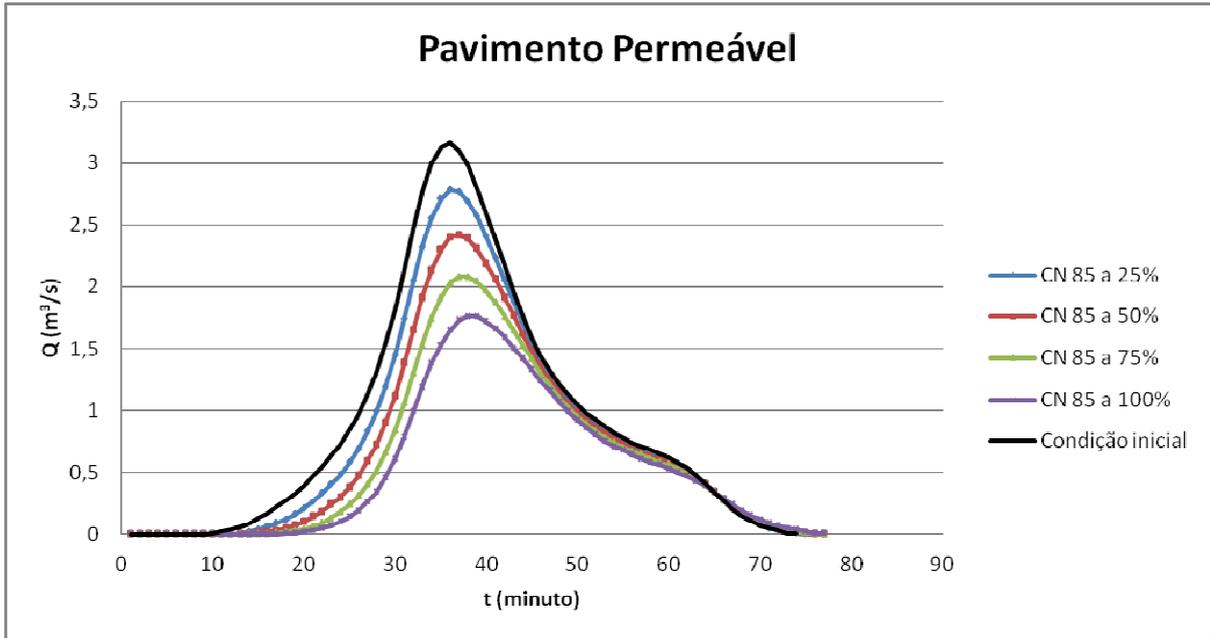
\_\_\_\_\_. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.

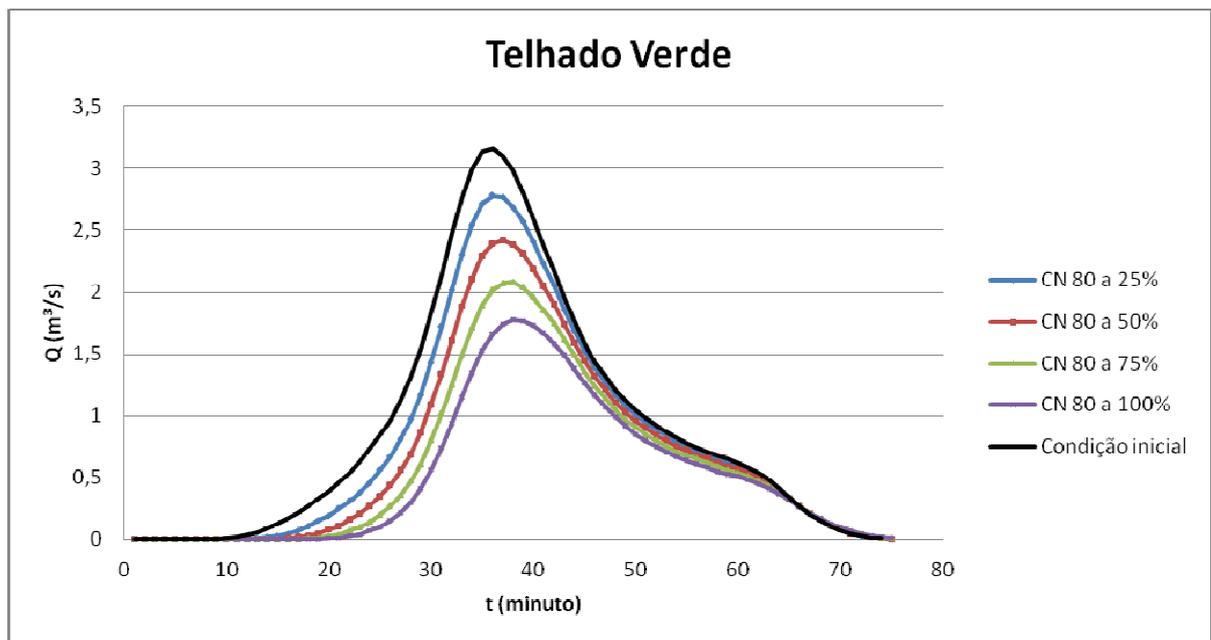
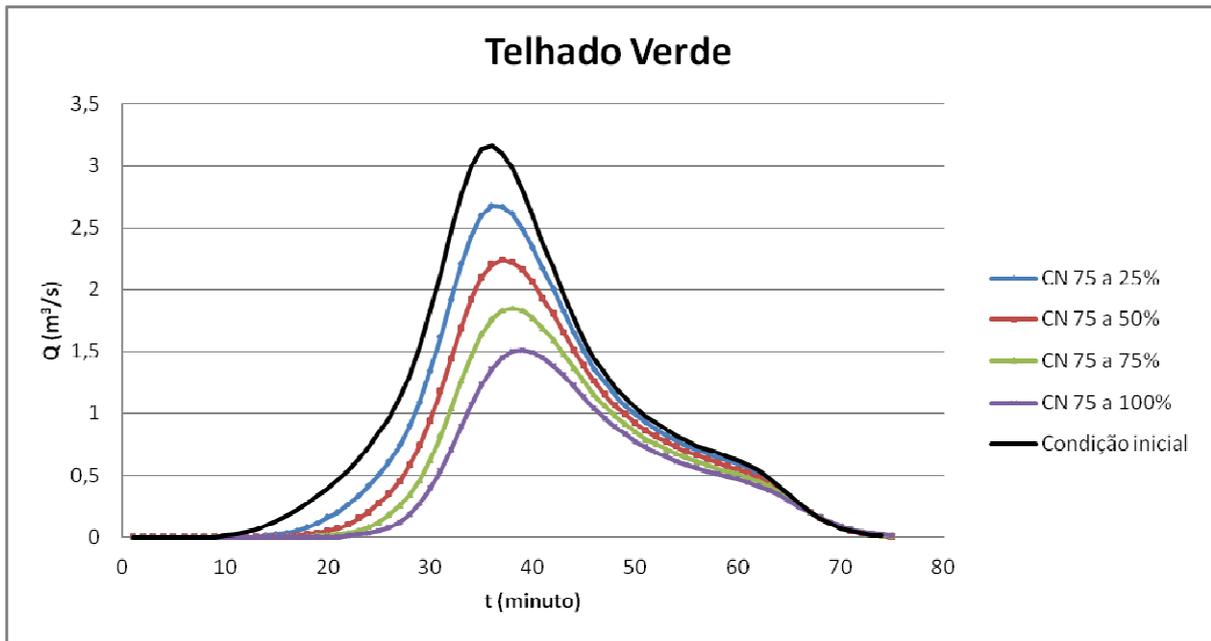
\_\_\_\_\_. **Inundações e drenagem urbana**. [s. l.], [20--?]. Disponível em: <[http://www.iph.ufrgs.br/pop\\_ups/LivroInundacoes/cap3-1.pdf](http://www.iph.ufrgs.br/pop_ups/LivroInundacoes/cap3-1.pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2011

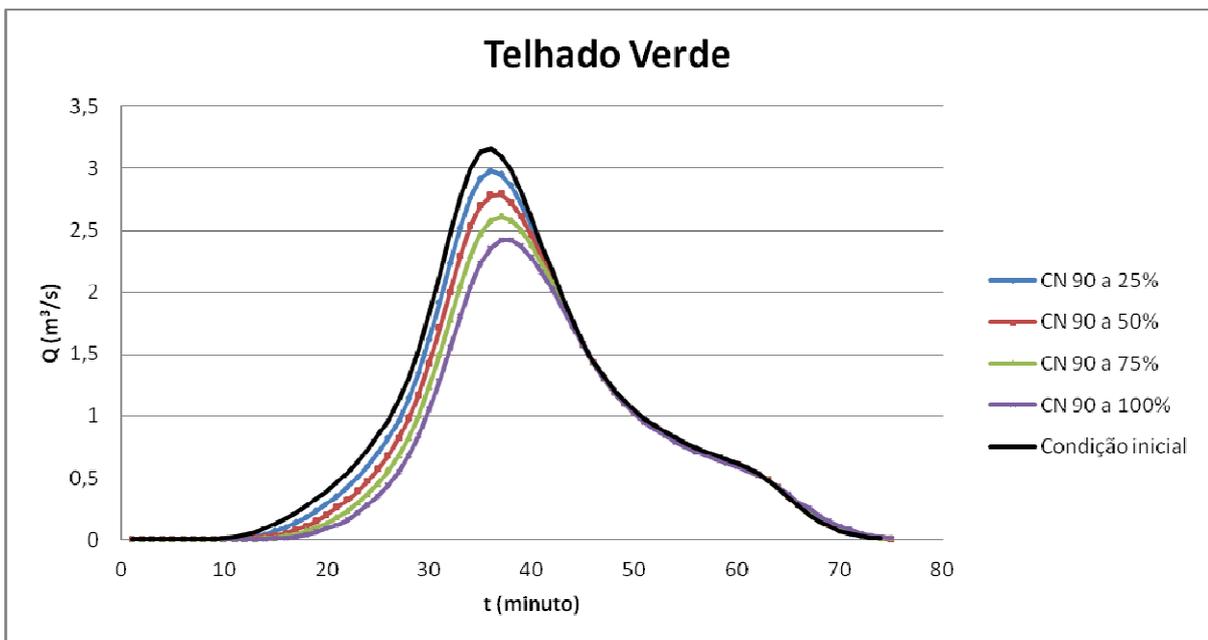
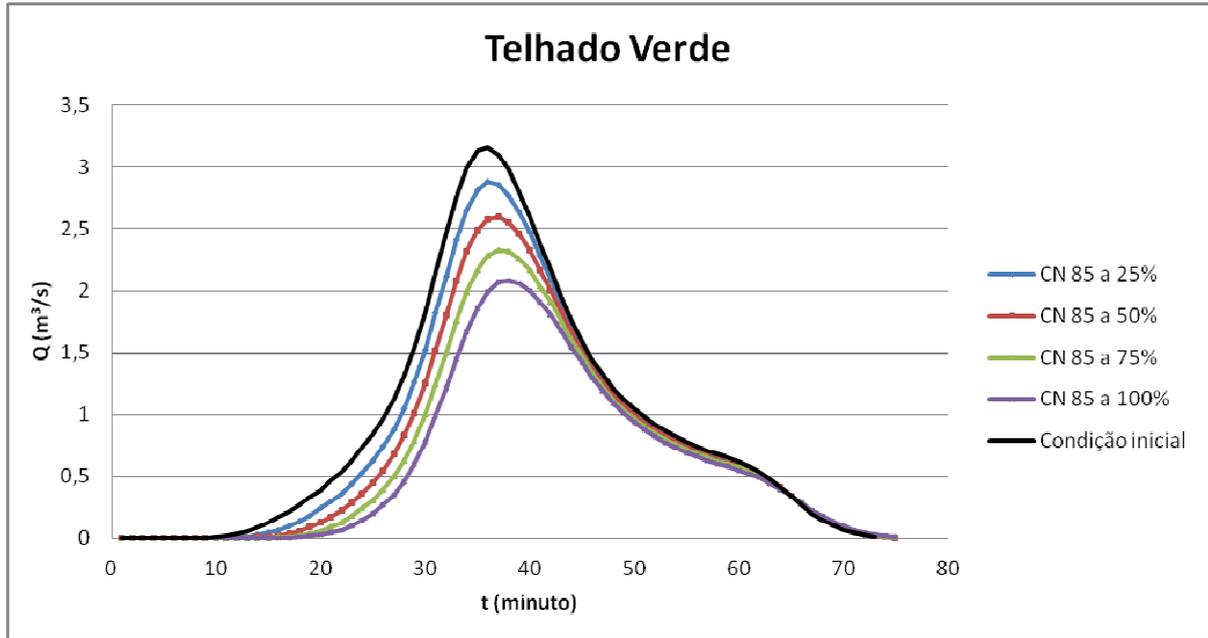
URBONAS, B; STAHERE, P. **Stormwater: best management practices and detection for water quality, drainage and CSO management**. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

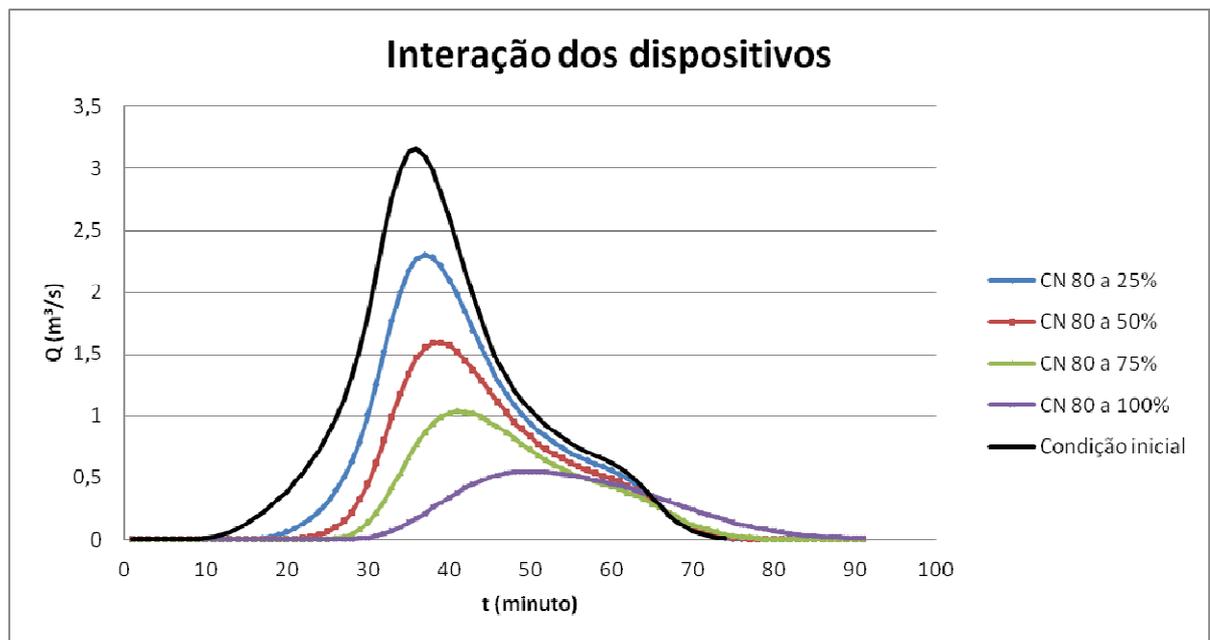
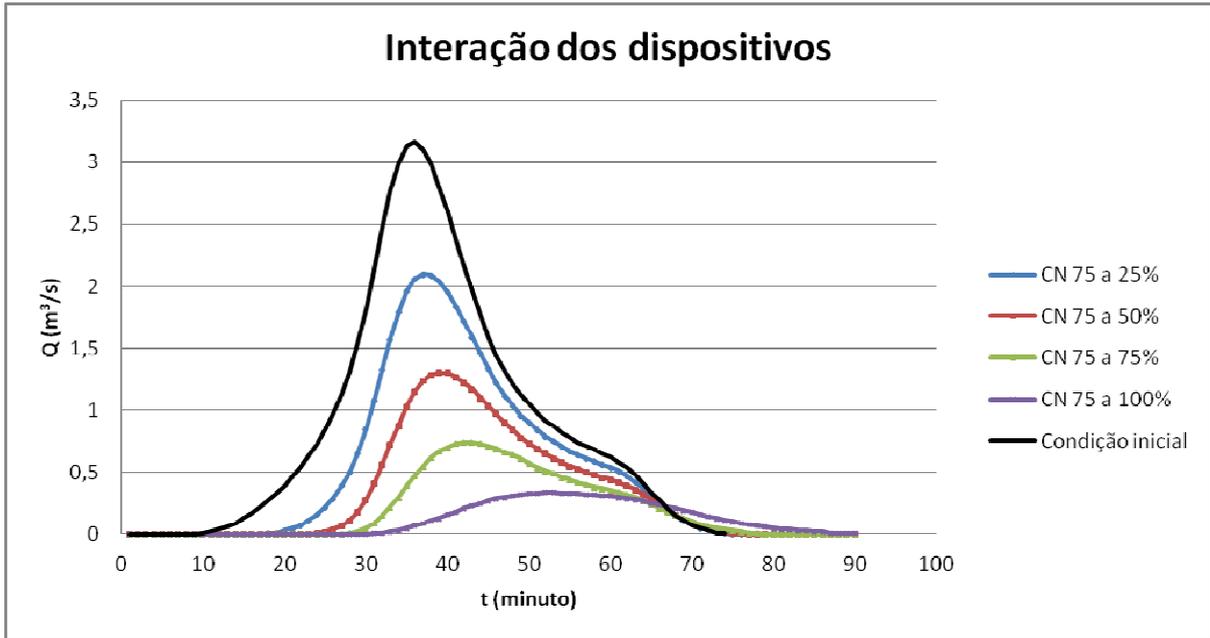
**APÊNDICE A – GRAFÍCOS COMPARATIVOS DAS VAZÕES**  
**(elaborado pelo autor)**

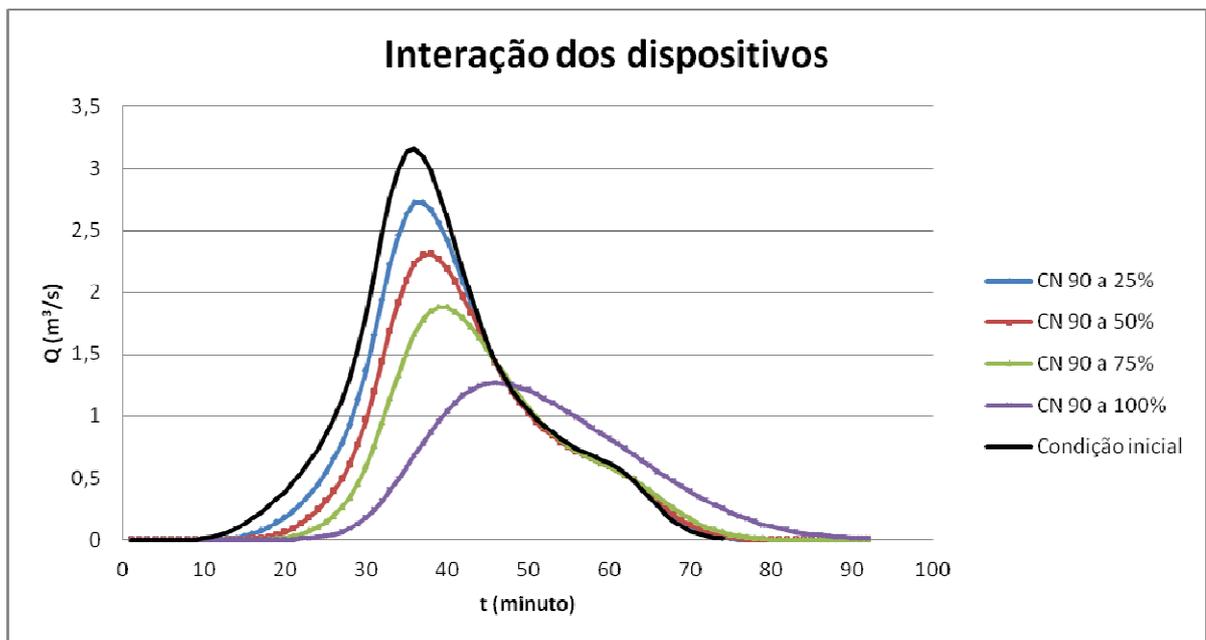
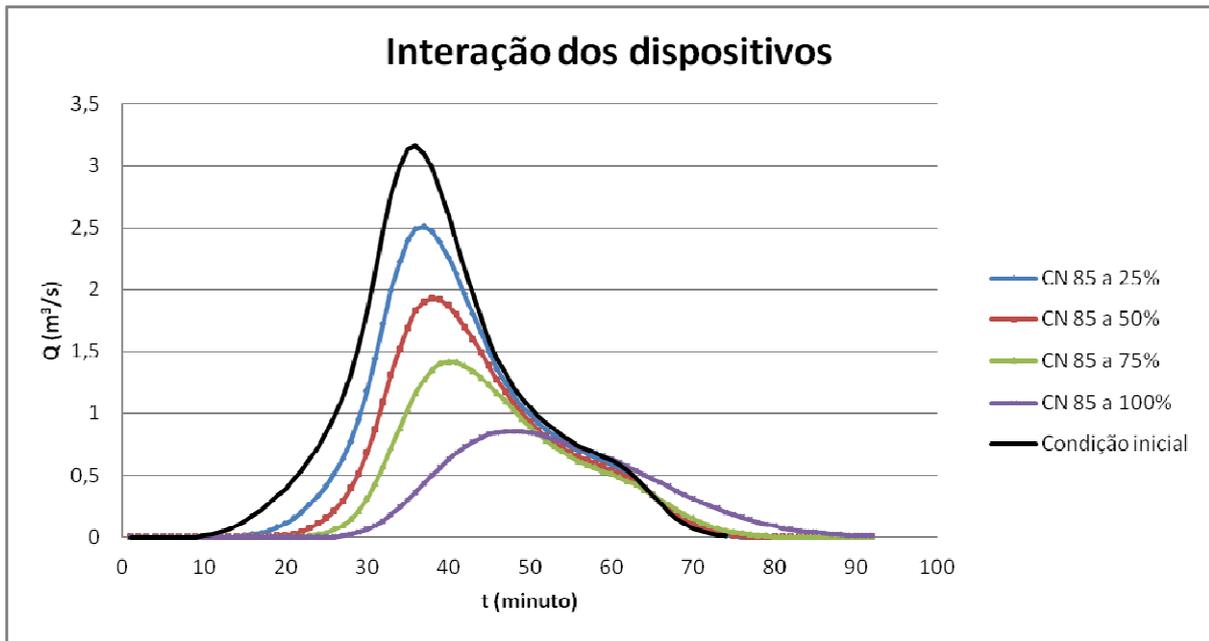












**APÊNDICE B – GRAFÍCOS COMPARATIVOS DOS TEMPOS DE  
RESPOSTA  
(elaborado pelo autor)**

