

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA DO MEIO  
AMBIENTE

**Cláudia de Sousa Guedes**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS**

Goiânia

2015

**CLÁUDIA DE SOUSA GUEDES**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira.

Goiânia

2015

**CLÁUDIA DE SOUSA GUEDES**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente – PPGEMA da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente, aprovada em 12 de março de 2015, pela banca examinadora, composta pelos professores:

---

**Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira - UFG**  
Presidente da Banca e Orientador

---

**Profª. Dr. Jussanã Milograna - IFG**  
Examinador Externo

---

**Prof. Dr. Joel Roberto Guimarães Vasco - UFG**  
Examinador Interno

## AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus e aos meus pais pelas oportunidades, serenidade, apoio e dedicação.

Ao meu orientador Professor Eduardo Queija de Siqueira, pela orientação, ensinamentos, conselhos e paciência ao longo de todas as etapas deste trabalho.

Ao professor Klebber Formiga pelos auxílios e ensinamentos.

Aos demais professores, colegas e demais funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Meio Ambiente, da Escola de Engenharia Civil e da Universidade Federal de Goiás, por todo aprendizado, amizade e condições que tornaram possível o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

À Emanuelle pelo auxílio, apoio e amizade. E pela ajuda essencial durante a parte experimental do trabalho. Muitíssimo obrigado.

A FINEP – pelo financiamento e custeio da maior parte desta pesquisa. À Capes pela bolsa concedida.

E a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e a conclusão desta pesquisa.

## RESUMO

GUEDES, C. S. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDROLÓGICO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS**. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

Neste trabalho foi avaliado o desempenho de pavimentos permeáveis com revestimentos do tipo Paver, Poroso e Concregrama sob diferentes condições de base, com vista no controle de escoamento superficial na fonte. Foram simulados, por meio de um simulador de chuva, eventos de chuva de intensidade de 100,80 mm/h com duração de 30 minutos e 64,20 mm/h e duração de 60 minutos, sobre os pavimentos construídos em três condições estruturais diferentes. O trecho I com 15 cm de camada de armazenamento, o trecho II com 7 cm e o trecho III com apenas 4 cm. Os ensaios foram feitos em duplicata e ao todo foram realizadas 36 simulações. Os pavimentos foram avaliados quanto à geração de escoamento, armazenamento e retenção do escoamento. Os nove pavimentos permeáveis avaliados nesta pesquisa permitiram a redução de mais de 50% do escoamento superficial e o retardo em média de 17 minutos do escoamento superficial, bem como o armazenamento temporário das águas pluviais. Em termos de coeficiente C, a estrutura que apresentou o melhor desempenho hidrológico foi o trecho I, cujos resultados variaram de 0 a 0,20. Apenas pavimentos com o revestimento Paver apresentaram escoamento superficial.

Palavras-chave: drenagem urbana, pavimentos permeáveis, controle do escoamento superficial e capacidade de armazenamento.

## ABSTRACT

GUEDES, C. S. **Evaluation of the hydrologic performance of permeable pavements** 2014. 91 f. Dissertation (Master's in Environmental Engineering) - Civil Engineering School, Graduate Program *Strict Sensu* in Environmental Engineering, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

This study evaluated the performance of permeable pavements with coatings the type Paver, Porous and Concregrama under different basic conditions in order to control runoff at the source. Were simulated by means of a simulated rainfall, the rain event intensity 100.80 mm/h with a duration of 30 minutes and 64.20 mm/h for 60 minutes, on the floor constructed in three different structural conditions. The stretch I with 15 cm storage layer, the stretch II with 7 cm and the stretch III with only 4 cm. The tests were performed in duplicate and all simulations were performed 36. The pavements were evaluated for the generation runoff, storage and retention of the flow. The nine permeable pavements evaluated in this study allowed a reduction of more than 50% of the runoff and the delay on average 17 minutes runoff, as well as the temporary storage of rainwater. In terms of coefficient C, the structure that presented the best hydrologic performance was the stretch I, the results varied from 0 to 0.20. Only pavements with Paver coating showed runoff.

Keywords: urban drainage, permeable pavements, control of runoff and storage capacity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Hidrograma hipotético de um cenário antes e depois da urbanização. ....	22
Figura 2 - Consequência da urbanização sobre a bacia hidrográfica.....	23
Figura 4 - Perfil esquemático de um pavimento permeável.....	30
Figura 5: Área de estudo. ....	35
Figura 6: Perfil esquemático dos trechos de pavimento. ....	36
Figura 7: (a) simulador de chuva; (b) desenho esquemático do simulador de chuva.....	39
Figura 8: (a) preparação do simulador para a sua verificação; (b) reservatório vertical para coleta de água. ....	40
Figura 9: Sensor de nível de água modelo U20-001-01.....	41
Figura 10: Hidrograma de verificação do simulador de chuva (a) $i = 97$ mm/h e (b) $i = 63$ mm/h. ....	45
Figura 11: Hidrogramas e infiltração do pavimento Paver com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	49
Figura 12: Evolução da umidade no tempo para o pavimento Paver com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b). ....	49
Figura 13: Ajuste dos dados de infiltração para o revestimento Paver no trecho I com simulação de 100,8 mm/h.....	51
Figura 14: Hidrogramas do pavimento Poroso com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b). ....	52
Figura 15: Evolução da umidade do solo no pavimento Poroso com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	52
Figura 16: Hidrogramas do pavimento Concregrama com simulação de 100,8 mm/h. ....	54
Figura 17: Evolução da umidade do solo no pavimento Concregrama com simulação de 100,8 mm/h.....	54
Figura 18: Hidrogramas e infiltração do revestimento Paver (trecho I) com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b). ....	56
Figura 19: Evolução da umidade no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h. ....	56
Figura 20: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	58
Figura 21: Hidrogramas do revestimento Poroso (trecho I) com simulação de 64,20 mm/h. ....	58
Figura 22: Evolução da umidade no pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h. ...	59
Figura 23: Hidrogramas do revestimento Concregrama (trecho I) com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	60
Figura 24: Evolução da umidade no pavimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	60
Figura 25: Hidrogramas e infiltração do revestimento Paver (trecho II) com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b). ....	62
Figura 26: Evolução da umidade no pavimento Paver com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	63

Figura 27: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Paver com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	64
Figura 28: Hidrogramas do pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	64
Figura 29: Evolução da umidade no pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	65
Figura 30: Hidrogramas do pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	66
Figura 31: Evolução da umidade no pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	66
Figura 32: Hidrogramas e infiltração do pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	68
Figura 33: Evolução da umidade no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	68
Figura 34: Ajuste dos dados de infiltração no revestimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	69
Figura 35: Hidrogramas do revestimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	70
Figura 36: Evolução da umidade no pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	70
Figura 37: Hidrogramas do revestimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	71
Figura 38: Evolução da umidade no pavimento com Concregrama com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	72
Figura 39: Hidrogramas e infiltração do revestimento Paver com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	74
Figura 40: Evolução da umidade no revestimento Paver com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	74
Figura 41: Ajuste dos dados de infiltração no revestimento Paver com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	75
Figura 42: Hidrogramas do pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	75
Figura 43: Evolução da umidade no pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e no ensaio 2 (b).	76
Figura 44: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	76
Figura 45: Hidrograma do pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h.	77
Figura 46: Evolução da umidade no pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h.	77
Figura 47: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h.	78
Figura 48: Hidrogramas do pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).	79

Figura 49: Evolução da umidade no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	80
Figura 50: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	80
Figura 51: Hidrogramas do pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b). ....	81
Figura 52: Evolução da saturação do solo no pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	81
Figura 53: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).....	82
Figura 54: Hidrograma do pavimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h.....	83
Figura 55: Evolução da umidade no pavimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h. ....	83
Figura 56: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h.....	83
Figura 57: Relação do volume total escoado ( $V_{tesc}$ ) e o volume precipitado na simulação de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h.....	84
Figura 58: Relação do coeficiente de escoamento (C) na simulação de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h.....	85
Figura 59: Relação do volume armazenado ( $V_{arm}$ ) e o volume precipitado na simulação de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h.....	87
Figura 60: Tempo de entrega ( $T_e$ ) para os escoamentos superficiais ( $E_{sup}$ ) e subsuperficiais ( $E_{sub}$ ) nas simulações de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h.....	88

## LISTA DE TABELAS / QUADROS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens do uso de pavimentos permeáveis.....	28
Tabela 2: Resumo dos principais resultados obtidos por Bruno (2011), Moura (2005), Silva (2006) e Castro (2011).....	47
Quadro 1: Tipos, composição e ilustração de revestimentos permeáveis.....	30
Quadro 2: Tipos de revestimento permeável utilizado e suas dimensões.....	37
Quadro 3: Intensidades de chuva.....	38
Quadro 4: Resultado dos testes realizados para a calibração do simulador de chuva.....	45
Quadro 5: Resultados das simulações no trecho I com intensidade de 100,80 mm/h e duração 30 min.....	48
Quadro 6: Resultados das simulações no trecho I com intensidade de 64,20 mm/h e duração 60 min.....	55
Quadro 7: Resultados das simulações no trecho II com intensidade de 100,80 mm/h e duração 30 min.....	62
Quadro 8: Resultados das simulações no trecho II com intensidade de 64,20 mm/h e duração 60 min.....	67
Quadro 9: Resultados das simulações no trecho III com intensidade de 100,80 mm/h e duração 30 min.....	73
Quadro 10: Resultados das simulações no trecho III com intensidade de 64,20 mm/h e duração 60 min.....	79
Quadro 11: Resumo dos ajustes do modelo de infiltração Horton.....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A - área de cada trecho ( $m^2$ )
- C – coeficiente de escoamento (adimensional)
- EPA- Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
- Esub - escoamento subsuperficial
- Esuper - escoamento superficial
- $f_0$  - capacidade de infiltração com solo seco (mm/h)
- $f_c$  - capacidade de infiltração final (mm/h)
- H - altura da camada de armazenamento (mm)
- i – intensidade de chuva (mm/h)
- I - taxa de infiltração da água no solo (mm/h)
- I(t) - capacidade de infiltração no instante t (mm/h)
- Ic - intensidade calculada por meio da equação de chuva (mm/h)
- i-d-f – intensidade-duração-frequência
- Ir - intensidade real da chuva simulada (mm/h)
- k - constante de decaimento da capacidade de infiltração ( $h^{-1}$ )
- $K_0$  - condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h)
- LID - Low Impact Development – Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto
- P – precipitação (mm ou m/d)
- Q - vazão (mm/h)
- $Q_p$  - vazão de pico (mm/h)
- $R^2$  - coeficiente de determinação
- t – duração da chuva (h)
- T – período de retorno (anos)
- $t_a$  - tempo de abertura das válvulas solenoides (s)
- $t_e$  - tempo de embebição (min.)
- $t_f$  - tempo de fechamento das válvulas solenoides (s)
- $T_p$  - tempo de pico (min.)
- $T_e$  - tempo de entrega do escoamento (min.)
- V - volume coletado (L)
- $V_{arm}$  - volume armazenado (L)

$V_e$  – volume escoado (L)

$V_{esc}$  - volume escoado superficialmente (L)

$V_f$  - infiltração acumulada (mm)

$V_{max}$  - volume armazenado (mm)

$V_p$  – volume precipitado (L)

$V_{prec}$  - volume precipitado (L)

$V_{sub}$  - volume escoado subsuperficialmente (L)

$V_{tesc}$  - volume total escoado (L)

$\Delta S$  - variação do armazenamento (L)

$\eta$  - porosidade do material

$\theta_i$  - umidade inicial do solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\theta_s$  - umidade do solo na saturação ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )

$\Psi$  - potencial matricial médio na frente de umedecimento (mm)

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVO GERAL.....	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1 Processos hidrológicos.....	17
3.2 Efeitos da urbanização sobre a drenagem urbana.....	21
3.3 Dispositivos de drenagem.....	24
3.3.1 Sistemas convencionais.....	24
3.3.2 Sistema alternativo.....	26
3.4 Pavimentos permeáveis.....	27
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	35
4.2 Experimento em campo.....	37
4.2.1 Determinação das intensidades de chuva.....	37
4.2.2 Simulador de chuva.....	38
4.2.3 Ensaios nos pavimentos.....	41
4.3 Análise do desempenho hidrológico.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1 Análise do desempenho hidrológico.....	84
6. CONCLUSÃO.....	90
7. REFERÊNCIAS.....	91

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, as grandes aglomerações em centros urbanos provocaram intervenções físicas nas bacias hidrográficas e alteraram o fluxo natural do escoamento da água da chuva. Esta ocupação ocasionou mudanças nas condições originais do meio, como a impermeabilização do solo, ocupação dos leitos dos rios e alteração no traçado original dos cursos d'água.

A diminuição da cobertura permeável do solo implica na transformação da água pluvial que antes infiltrava em um acréscimo no escoamento superficial, ocasionando assim frequentes inundações. Para Hou et al. (2008) essa impermeabilização acarreta múltiplos impactos sobre a bacia hidrográfica, como o aumento da vazão, diminuição do tempo de pico, erosão das margens dos rios e carreamento de sedimentos para o leito dos corpos d'água.

Para Bruno (2011) a urbanização das cidades deveria ser acompanhada pelo planejamento urbano e investimentos na infraestrutura. A deficiência no planejamento urbano, a falta de controle sobre o uso e ocupação do solo, ocupação de áreas ribeirinhas e sistemas de drenagem ineficientes resulta no comprometimento da qualidade de vida da população. A maioria das cidades de grande e médio porte do país sofrem com a falta de planejamento da drenagem urbana que após consolidada a urbanização, as medidas corretivas para evitar os transtornos, como as inundações, tornam-se extremamente caras. Em áreas urbanas, as inundações levam a consequências sociais, ambientais e econômicas, como por exemplo, perdas de vida, degradação do ambiente e da paisagem urbana, prejuízos patrimoniais, econômicos e financeiros (TUCCI, 1995).

Os sistemas de drenagem comumente utilizados hoje no Brasil, para tentar solucionar os problemas acarretados pelas águas pluviais, baseiam-se na teoria higienista, que consiste na canalização do escoamento e que prevê o afastamento rápido da água de um ponto a outro. Os sistemas convencionais, como são chamados, mostram-se muitas vezes ineficientes no combate das inundações, pois na sua concepção geralmente não são observadas as consequências a jusante de ações feitas a montante.

Como muitas vezes os sistemas de drenagem convencionais não comportam mais o escoamento atual da água da chuva, são utilizados também dispositivos que visam o controle da qualidade do ambiente urbano na fonte. Chamados de sistema de drenagem alternativo, sustentável ou compensatório, esses dispositivos tentam compensar as consequências da urbanização, promovendo a infiltração e o armazenamento de parte do escoamento superficial.

Os sistemas de drenagem alternativos procuram imitar o ciclo hidrológico natural e reduzir os problemas relacionados à impermeabilização do solo. Ao contrário da drenagem convencional, seu princípio baseia-se na diminuição da vazão e do volume de escoamento na fonte e não na transferência de impactos para jusante.

Técnicas como pavimentos permeáveis possibilitam o aumento da infiltração do solo e buscam reverter o hidrograma resposta da bacia para uma condição mais próxima da pré-urbanização. Os pavimentos permeáveis são formados por estruturas drenantes assentadas sobre material granular (areia e brita). Eles permitem a redução do escoamento superficial na fonte, promovendo o armazenamento temporário da água e reduzindo também o “tempo de entrega” da água da chuva para o sistema convencional de drenagem (ALENCAR, 2013). No Brasil, apesar dos vários trabalhos sobre pavimentos permeáveis, seu comportamento deve ser estudado, pois sua eficiência leva em consideração características específicas do local a ser instalado.

Este trabalho se justifica pela necessidade do desenvolvimento de estudos sobre a aplicabilidade e performance dos pavimentos permeáveis que levem em conta as condições específicas de assentamento e revestimento bem como do clima e do solo no município de Goiânia, uma vez que poucos trabalhos contemplam essa região.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Avaliar o desempenho de pavimentos permeáveis, com vista no controle de escoamento superficial na fonte.

### **2.1 Objetivos Específicos**

- Analisar o efeito dos diferentes tipos de revestimentos e de substratos sobre os hidrogramas dos escoamentos de saída;
- Avaliar o desempenho dos pavimentos sobre as diferentes intensidades e durações de chuvas aplicadas;
- Avaliar e comparar o desempenho desses pavimentos em termos de coeficientes de escoamento, volume de armazenamento e tempo de entrega.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Processos hidrológicos

Os processos hidrológicos devem ser considerados na definição e implantação de um projeto de drenagem, ou seja, para o dimensionamento e execução de dispositivos de drenagem, há como pressuposto o conhecimento das características hidrológicas locais (BRITO, 2006).

O comportamento dos processos hidrológicos envolvem as variáveis do balanço hídrico, que corresponde na diferença do volume de entrada e de saída no sistema. A principal entrada de água em uma bacia é a precipitação. A saída de água da bacia pode ocorrer, de forma geral, por evapotranspiração e por escoamento (CASTRO, A., 2011). Além desses processos, podem ser considerados também os processos de interceptação, armazenamento em depressões e infiltração.

Os processos contabilizados neste trabalho foram: precipitação, escoamento superficial, infiltração e armazenamento. O balanço hídrico destes processos pode ser representado matematicamente por meio da equação 1 (SCHNOOR, 1996).

$$\Delta V = (\Sigma Q_{in} - \Sigma Q_{out} - Q_{seep} + PA - EA) \Delta t \quad (1)$$

Onde  $\Delta V$  é a variação do armazenamento ( $m^3$ ),  $Q_{in}$  é a vazão de entrada ( $m^3/d$ ),  $Q_{out}$  é a vazão de saída ( $m^3/d$ ),  $Q_{seep}$  é a vazão de infiltração ( $m^3/d$ ),  $P$  é a precipitação ( $m/d$ ),  $A$  é a área ( $m^2$ ),  $E$  evaporação ( $m/d$ ) e  $\Delta t$  expressa o tempo, dias.

Uma fração do volume precipitado é retida pela vegetação de onde parte evapora e o restante atinge a superfície do solo. Essa perda inicial da precipitação é chamada de interceptação. Da água da chuva que atinge o solo, parte é armazenada em depressões do terreno, parte se infiltra e o restante escoar superficialmente. Os processos de interceptação e armazenamento em superfície reduzem ao longo do tempo e a infiltração torna-se constante (PINTO et al., 1976; PRUSKI, RODRIGUES e SILVA, 2001)

A parte de água advinda da precipitação que não consegue infiltrar no solo é transformada em escoamento superficial, o tempo até o início do escoamento é denominado de tempo de embebição ( $t_e$ ). Esse intervalo de tempo corresponde à ação da interceptação pelos vegetais, à saturação do solo e ao armazenamento de água nas depressões da superfície (PINTO et al., 1976).

De todos os processos hidrológicos envolvidos em uma bacia hidrográfica o escoamento superficial é considerado o mais importante, sendo alvo de estudos ligados ao seu aproveitamento e proteção contra os efeitos causados pelo seu deslocamento (BRAGA, 2000).

Segundo Tucci (2000) o coeficiente de escoamento, também chamado de coeficiente de deflúvio, varia de acordo com a intensidade e distribuição da precipitação, saturação e a retenção do solo. Ainda segundo o autor, este coeficiente é importante para se analisar o balanço hídrico na bacia e cenários de urbanização. O coeficiente de escoamento (C) é o cociente entre o volume do escoamento superficial e o volume precipitado, conforme a equação 2.

$$C = \frac{V_e}{V_p} \quad (2)$$

C – coeficiente de escoamento (adimensional);

$V_e$  – volume escoado (L);

$V_p$  – volume precipitado (L).

A razão entre os volumes escoados e o precipitado varia de 0 a 1 e assume um valor maior para áreas com baixa infiltração e menor para áreas permeáveis e bem vegetadas (CASTRO, 2011). Ou seja, o valor de C é influenciado diretamente pela impermeabilização do solo, que é um reflexo do impacto da urbanização sobre a bacia hidrológica (GAROTTI e BARBASSA, 2010). Alguns estudos confirmam essa relação do coeficiente de escoamento com a impermeabilidade da área, como por exemplo, Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) e Rushton (2001).

Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) com o propósito de avaliar a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial, realizaram um experimento que consistiu na simulação de chuva sobre diferentes tipos de superfícies (solo compactado, paralelepípedos, blocos de concreto, concreto, blocos vazados e concreto poroso). Foram efetuadas simulações de chuva com intensidade de 111,9 mm/h e duração de 10 minutos. O escoamento superficial foi registrado em intervalos de 30 segundos e o coeficiente de escoamento foi obtido pela razão entre os valores da chuva e do escoamento superficial. Os coeficientes obtidos no ensaio foram de 0,95 para a superfície de concreto impermeável, 0,66 para solo compactado, 0,03 para bloco

vazado e 0,005 para o concreto poroso. Os autores concluíram que os blocos de concreto maciço, considerados semipermeáveis, apresentaram um coeficiente de escoamento 44% superior ao do solo compactado e que, apesar de não haver garantia de manutenção das condições de pré-urbanização, houve uma significativa redução do escoamento. Os baixos valores obtidos nos experimentos realizados sobre os pavimentos permeáveis reforça a contribuição positiva do uso desse sistema para redução do escoamento superficial.

Sendo assim, os resultados obtidos por Araújo, Tucci e Goldenfum (2000) confirmam que quanto mais impermeável a área, maior é o valor do coeficiente de escoamento, e atentam para a importância da substituição de revestimentos impermeáveis por permeáveis. Mas deve-se ressaltar que a eficiência e o coeficiente C dos pavimentos estão relacionados com as características do solo e as intensidades de chuvas de cada região.

A infiltração é o fenômeno de penetração da água no solo, por meio de seus espaços vazios, sob a ação da gravidade, de forma a permitir que parte da precipitação atinja a zona não saturada do solo promovendo a manutenção da umidade do solo (PINTO et al., 1976). Genericamente, a infiltração é a diferença entre a precipitação (P) e o escoamento superficial (E<sub>super</sub>), expressa na equação 3 (COLLISCHONN e TASSI, 2008).

$$I=P-E_{super} \quad (3)$$

Segundo Sales (2008), a infiltração no solo é influenciada por diversos fatores, entre eles: características do solo (cobertura do solo, permeabilidade e teor de matéria orgânica), declividade, grau de compactação, teor de umidade, intensidade e duração da precipitação. No caso de pavimentos permeáveis a infiltração está relacionada com a porosidade do material, as dimensões das arestas do revestimento (no caso de bloco de concreto), a colmatação do revestimento e da base e as características da camada de assentamento e da base como o teor de espaços vazios de cada material.

A análise da infiltração do solo é importante para a elaboração de projetos de drenagem e irrigação, nele é levada em consideração a taxa de infiltração estável. Essa taxa corresponde ao valor final constante atingido com o decréscimo da taxa de

infiltração inicial ao atingir o solo, sendo a taxa de infiltração a quantidade de água que atravessa a unidade de área da superfície do solo pelo tempo (BRUNO, 2011).

A infiltração da água pode ser descrita por diversos modelos. Esses modelos são classificados em modelos teóricos e empíricos. Os modelos teóricos foram desenvolvidos a partir de leis da física e os modelos empíricos sintetizam uma série de resultados observados em diversos ensaios (PAIXÃO et al. 2004).

Um exemplo de modelo empírico é a equação de Horton, obtida por meio de experimentos no campo, que deve ser aplicado quando a intensidade de precipitação for maior que a capacidade de infiltração da superfície (MOURA, 2005).

Conforme Lima (2008), o conceito de infiltração foi introduzido nos processos hidrológicos por Horton em 1933, onde definiu a capacidade de infiltração é a capacidade que um solo tem de absorver a água pela sua superfície. O modelo de Horton (equação 4) baseia-se na teoria do decaimento, na qual a taxa de infiltração varia em direção a um valor constante e decresce na medida em que o seu valor atual se aproxima desse valor constante (AGUIAR et al. 1998).

A escolha do uso desse modelo neste trabalho se baseou na facilidade do ajuste de seus parâmetros a partir de dados experimentais de campo, como os obtidos nesta pesquisa.

$$I(t)=f_c+(f_0-f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

Em que:

$I(t)$  – taxa de infiltração no instante  $t$  (mm/h)

$f_c$  - capacidade de infiltração mínima (final) (mm/h)

$f_0$  - capacidade de infiltração inicial (mm/h)

$k$  - constante de decaimento da capacidade de infiltração ( $h^{-1}$ )

$t$  - tempo (h)

A constante  $k$  é uma constante de proporcionalidade que depende do tipo de solo/revestimento e da intensidade da precipitação. Seu valor é obtido experimentalmente, pelo ajuste do modelo teórico aos dados experimentais representados pelo gráfico de infiltração (PAIXÃO et al. 2004).

### 3.2 Efeitos da urbanização sobre a drenagem urbana

O processo acelerado da urbanização, muitas vezes desordenada, contribui com impactos negativos sobre o meio ambiente. As alterações sofridas no ambiente urbano provocam transformações na bacia hidrográfica, que, conseqüentemente, acarretam na queda da qualidade de vida da população, que convive frequentemente com problemas de inundações e contaminação dos mananciais superficiais e subterrâneos (SILVEIRA, 2008).

A falta de planejamento do uso e ocupação em áreas urbanas leva a um impacto negativo sobre os cursos d'água e na alteração da cobertura do solo. As mudanças na cobertura do solo devem-se à diminuição de áreas permeáveis, que resultam na alteração do escoamento e no balanço hídrico das águas pluviais. Estas mudanças implicam também na redução de interceptação, do armazenamento superficial e infiltração das águas pluviais (BAPTISTA, NASCIMENTO E BARRAUD, 2005).

As áreas impermeáveis, tais como estradas, calçadas e telhados, durante os eventos de chuva, são os principais fatores responsáveis pelo agravamento dos problemas relacionados às inundações nas cidades, pois ocasionam o aumento da velocidade e da quantidade de escoamento superficial se comparado com áreas pouco urbanizadas e mais permeáveis (COLLINS, HUNT e HATHAWAY, 2006).

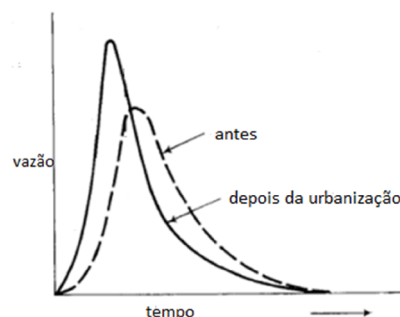
Com o objetivo de avaliar os impactos da urbanização sobre a bacia hidrográfica e contribuir para o planejamento de bacias urbanas, Boggs e Sun (2011) pesquisaram duas bacias: uma urbanizada (0,7 km<sup>2</sup>) e outra não urbanizada (2,95 km<sup>2</sup>) na Carolina do Norte (EUA). A pesquisa foi realizada em diferentes épocas do ano, onde foi comparado o balanço hídrico entre cada região estudada. Os autores concluíram que a bacia urbanizada apresentou maior taxa de escoamento (vazão e volume) em relação à bacia não urbanizada.

Para Tucci, Hespanhol e Cordeiro Netto (2003) as inundações têm sido uma das grandes calamidades sofridas pela sociedade, e isso é consequência da ocupação do leito maior dos rios e da urbanização desenfreada. Tucci (2006) afirma que, além da impermeabilização do solo que aumenta a frequência e magnitude das inundações, o desenvolvimento urbano pode também trazer obstruções ao escoamento, como aterros, pontes, drenagens inadequadas, obstruções ao escoamento junto a condutos e assoreamento do leito dos rios.

Alcântara e Santos (2003), em seu estudo sobre o efeito da urbanização na hidrologia da bacia da Laguna da Jansen em São Luís – MA, afirmam que a intensa urbanização na região provocou mudanças como: aumento do escoamento superficial, redução da taxa de infiltração, redução da recarga de aquífero, redução da evapotranspiração, aumento da frequência de inundação em áreas da bacia com cotas baixas. Além disso, a ocupação foi capaz de alterar a topografia, sendo responsável por um maior carreamento de solo para a laguna, provocando alterações ecológicas e de assoreamento.

A retirada da cobertura vegetal do solo associada com a sua impermeabilização acarretam em uma parcela maior de escoamento superficial resultando no incremento da vazão de pico e diminuição no tempo de pico (BATISTA, LUZ e SILVA, 2012). Verifica-se que a urbanização de uma bacia altera a sua resposta à ocorrência de precipitação. A figura 1 representa o hidrograma hipotético de um cenário de pré e pós-urbanização. Em condições de pré-urbanização, o solo é protegido pela cobertura vegetal, contribuindo com maior interceptação, armazenamento e infiltração da água da chuva, reduzindo assim o volume de escoamento superficial.

Figura 1- Hidrograma hipotético de um cenário antes e depois da urbanização.



Fonte: adaptado de LEOPOLD, (1968).

No hidrograma resposta da bacia de pós-urbanização, observam-se uma maior vazão de pico e um tempo de pico menor que em condições naturais. Assim, como observado na figura 1, Tavanti (2009) afirma que o escoamento superficial é uma das principais parcelas do ciclo hidrológico que deve ser levado em conta na gestão da drenagem pluvial, pois leva em consideração as características do solo e a sua taxa de infiltração.

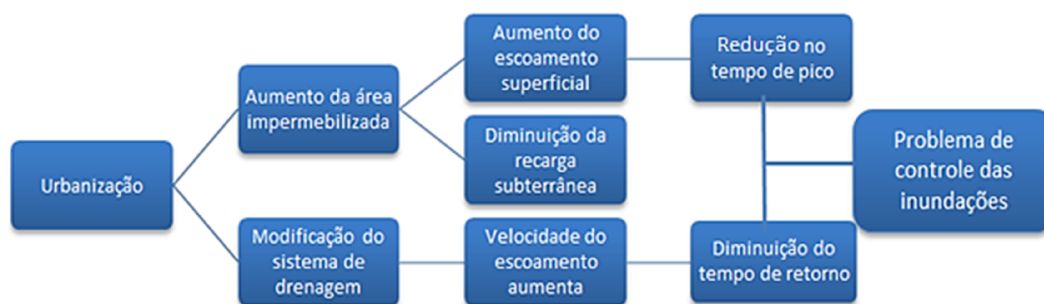
Tucci, Porto e Barros (1995) afirmam que o aumento da vazão máxima e a antecipação do tempo de pico ocorrem devido a áreas impermeáveis e também ao transporte de água por meio de dispositivos de drenagem, como sarjetas e canais. Os

dispositivos artificiais de drenagem promovem uma maior velocidade de escoamento superficial, por não possuírem obstáculos e intercepções como em superfícies naturais e corpos d'água.

É amplamente reconhecido que a urbanização muda os processos hidrológicos em bacias hidrográficas, suas consequências sobre a drenagem urbana são apresentadas na figura 2. Observa-se que a urbanização reduz a infiltração e tem o potencial de aumentar o volume e a velocidade de escoamento, causando impactos sobre a dinâmica de cheias, resultando assim em dificuldades no controle de inundações.

De acordo com Du et al. (2012), um dos principais objetos de pesquisa nas últimas décadas é a influência da urbanização sobre o escoamento superficial e hidrograma em bacias hidrográficas.

Figura 2 - Consequência da urbanização sobre a bacia hidrográfica.



Fonte: adaptado HALL, 1984 apud SHINMA, 2011.

Rose e Peters (2001) compararam características da vazão de escoamento em três regiões próximas à cidade de Atlanta, uma região altamente urbanizada, outra região pouco urbanizada e outra não urbanizada. As bacias hidrográficas foram selecionadas de acordo com a disponibilidade de dados de vazão em longo prazo. Foi observado um aumento de 30% a 100% na vazão de pico da primeira área em relação às demais. Os autores atribuem este resultado ao aumento da impermeabilidade do solo e do uso de sistemas de drenagem mal dimensionados.

Suriya e Mudgal (2012) analisaram o efeito das mudanças de uso do solo sobre os processos hidrológicos na sub-bacia de Thirusoolam em Chennai (Índia). O estudo foi realizado com a classificação do uso de solo da região (entre 1976 a 2005), a modelagem do escoamento da água da chuva usando o HEC-HMS e o mapeamento das áreas de risco e de zonas de inundação. Os autores concluíram que o acelerado aumento

da população e a alteração no uso do solo são as principais razões para a ocorrência de inundações e que esses impactos devem ser levados em consideração no planejamento e gestão de bacias hidrográficas.

Batista, Luz e Silva (2012), também simularam alterações de uso e ocupação de solo sobre o escoamento em três bacias hidrográficas diferentes localizadas no sul de Minas Gerais, nas cidades de Poços de Caldas e Itajubá. O efeito do crescimento da urbanização nas vazões das três bacias foi avaliado por meio da modelagem hidrológica, com o auxílio do software IPHS-1. Os hidrogramas de resposta para os cenários propostos de urbanização na área de estudo, há uma forte tendência de diminuição dos tempos de concentração e o aumento das vazões máximas.

Para Braud et al. (2012), a urbanização está associada à construção de estruturas artificiais, como redes de água tratada, esgoto, água pluvial e infraestruturas viárias, as quais contribuem para alteração do ciclo hidrológico e dos ecossistemas aquáticos. Os autores sugerem o controle da qualidade do ambiente urbano com a utilização de medidas estruturais e não estruturais para a atenuação e contenção dos impactos atribuídos à urbanização.

As medidas não estruturais são do tipo preventivo, englobam o planejamento e gestão da área, tais como zoneamento de áreas de inundação e sistema de alerta. Já as medidas estruturais são de caráter construtivo, obras de engenharia que procuram reduzir o risco de enchentes, como a construção de diques e de sistemas de coleta de da água da chuva (TUCCI, 2005).

### **3.3 Dispositivos de drenagem**

Na tentativa de controlar e minimizar os efeitos da impermeabilização do solo sobre uma bacia urbana podem ser destacados dois tipos de medidas estruturais: os Sistemas Convencionais e os Sistemas Alternativos.

#### **3.3.1 Sistemas convencionais**

Para a minimização de futuros problemas de inundações, a ocupação de áreas urbanas deve ser analisada no contexto da bacia hidrográfica na qual estão inseridas. O sistema de drenagem faz parte do conjunto de melhoramentos públicos existentes em

uma área urbana, que visa eliminar as dificuldades ou as interrupções das atividades urbanas que ocorrem devido às inundações e interferências de enxurradas (RAMOS, BARROS e PALOS, 1999).

Um sistema de drenagem de águas pluviais é composto de uma série de unidades e dispositivos hidráulicos que envolvem a coleta de água pluvial na área urbana e seu retorno ao curso d'água com o objetivo de prevenir e controlar as inundações (TUCCI, 2005). Os sistemas de drenagem diferem-se entre si pelas diretrizes gerais do projeto, onde baseiam-se nos conceitos de retenção e escoamento pluvial (WALESH, 1989 apud CANHOLI, 2005).

As soluções convencionais de drenagem urbana, sistema mais frequentemente adotado no Brasil, seguem a proposta de canalização das águas pluviais, cujo objetivo é promover o afastamento rápido da água e transferir para jusante o escoamento pluvial por canalização e retificação de cursos d'água, o que traz problemas a outras áreas e não resolve efetivamente o problema.

O sistema de drenagem é composto por dois sistemas distintos: o de micro e de macro-drenagem. O sistema de micro-drenagem é composto por pavimentos das ruas, sarjetas, bocas de lobo, rede de galerias de águas pluviais, projetados para escoamento com período de retorno de 2 a 10 anos. Os dispositivos de macro-drenagem são os canais de maiores dimensões, projetados geralmente com período de retorno de 25 a 100 anos (RAMOS, BARROS E PALOS, 1999).

Os dispositivos tradicionais de drenagem urbana, segundo Sener (2007), implicam na impermeabilização das superfícies do terreno de modo que o escoamento passa ser transmitido por meio de sarjetas e tubulações subterrâneas as quais encaminham o escoamento pluvial para os corpos d' água. Muitas vezes, o uso desses dispositivos agravam ou intensificam problemas como as inundações, evidenciando assim, em muitos casos, a sua ineficiência frente a precipitações mais severas (RIGHETTO, 2009).

Mesmo que as soluções para este problema por parte da administração pública geralmente sejam voltadas para o uso de medidas tradicionais/convencionais, o planejamento da drenagem urbana vem sofrendo modificações com o passar dos anos e novos conceitos foram surgindo. Conceitos esses que se opõem ao da evacuação rápida das águas pluviais e que buscam reduzir o impacto da urbanização na fonte. Esse novo conceito, chamado de sistema de drenagem alternativo ou compensatório, procura

compensar ou minimizar os impactos da urbanização sobre o ciclo hidrológico (ARAÚJO, TUCCI e GOLDENFUND, 2000; SILVA, 2006).

### **3.3.2 Sistema alternativo**

Os sistemas de drenagem alternativos, conhecidos também sistemas de retenção, são estratégias locais que têm por objetivo manter ou reproduzir o regime hídrico de uma área pré-urbanizada. Estas são técnicas que visam à redução de superfícies impermeáveis promovendo o armazenamento, a infiltração e a recarga da água subterrânea (EPA, 2000).

O uso desse sistema tem como enfoque a manutenção e recuperação de toda a bacia hidrográfica, ou seja, busca-se resolver o problema advindo da impermeabilização tanto interna quanto externamente à área urbana onde é instalado, diferente do conceito utilizado pelo sistema convencional onde procura apenas corrigir localmente (SILVEIRA, 2002).

Sobre o ciclo hidrológico, o uso desses sistemas visa restaurar as condições naturais alteradas pelo processo de urbanização por meio da redução dos volumes e vazão que escoam superficialmente (TAVANTI e BARBASSA, 2012). As técnicas compensatórias de drenagem controlam esse volume por meio de estruturas de armazenamento de águas pluviais, resultando no amortecimento das cheias, na infiltração da água no solo e no retardo escoamento a ser direcionado à rede pluvial (RIGHETTO, 2009).

Segundo a USEPA- Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (2000), essas práticas além de oferecerem benefícios ambientais como a conservação do recurso hídrico, são práticas mais econômicas se comparadas com os dispositivos tradicionais. A implantação e ampliação destes dispositivos resultam em menos transtornos no local e podem ser facilmente construídos acompanhando o crescimento da malha urbana. Já os sistemas tradicionais contam com obras de ampliação, muitas vezes, inviáveis e de vida útil curta frente ao desenvolvimento da cidade (SILVEIRA, 2002).

Os sistemas alternativos, tais como sistema de bioretenção, poços e valas de retenção, bacias de detenção, micro reservatórios de detenção (como barris de chuva), telhados verdes, cisternas, trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis, sabidamente, realizam tanto a redução do escoamento superficial quanto de poluentes (EPA, 2000; TAVANTI, 2009).

Visando aliviar os sistemas de drenagem convencional, Peiter e Poletto (2012) analisaram o desempenho de trincheiras de infiltração, no município de Toledo – PR. As trincheiras foram construídas com quatro tipos de preenchimento: pedrisco, pedra britada, pedra de argila e rachão, os testes foram realizados em laboratório e em campo para verificar a capacidade de armazenamento inicial do dispositivo e também verificar a capacidade de infiltração no solo. Os testes mostraram que o dispositivo preenchido com o rachão apresentou uma maior capacidade de armazenamento, com 0,264 m<sup>3</sup> de água para cada m<sup>3</sup> de rachão. Sendo assim, o uso do dispositivo mostrou-se uma alternativa de controle do escoamento superficial, representando uma boa capacidade de retenção, mesmo em solos mais argilosos.

A utilização e implantação de sistemas de drenagem alternativos têm sido incentivadas pelo Ministério da Integração Nacional. O Manual de Drenagem Urbana Sustentável (BRASIL, 2007), apresenta fundamentos técnicos e orientações para promover a gestão sustentável da drenagem urbana nos municípios. Para Souza, Cruz e Tucci (2012) o sucesso do programa é refém da capacidade gerencial de cada município na adoção dessas técnicas. Os autores sugerem a conscientização sobre os benefícios do LID junto à população para estimular reformas e aplicação desses dispositivos.

Dentre todos os dispositivos LID, destacam-se como objeto deste estudo os pavimentos permeáveis os quais, segundo EPA (2000), são eficazes na redução de área impermeável em uma bacia urbana.

### **3.4 Pavimentos permeáveis**

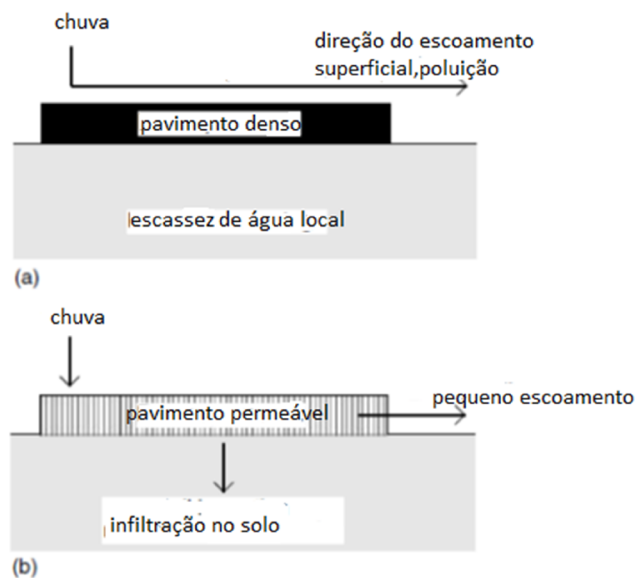
Estudos com pavimentos permeáveis tiveram início na França nos anos de 1945-1950. Com seu aperfeiçoamento, o uso desse dispositivo foi difundido a partir da década de 70, com o interesse de países como a França, Estados Unidos, Japão e Suécia (AZZOUT et al., 1994 apud ACIOLI, 2005; SOUZA, CRUZ e TUCCI, 2012). Nos anos seguintes a busca pela redução das áreas impermeáveis em ambiente urbano levou, nos últimos 30 anos, à criação de diversos manuais técnicos, que focam em experiências de aplicação e diretrizes para sua implantação (FERGUSON, 2005).

Os pavimentos permeáveis são superfícies com a mesma função de um pavimento convencional, com a diferença que promovem a infiltração, armazenamento e percolação do escoamento superficial gerado pela chuva para dentro de uma camada

de armazenamento temporário no terreno, a qual pode ser absorvida gradualmente pelo solo (COSTA, SIQUEIRA e MENEZES FILHO, 2007).

Pavimentos permeáveis são definidos como aqueles que possuem espaços vazios em sua estrutura que permitem a passagem da água. Na Figura 3, ilustra-se o efeito sobre o escoamento do uso de um pavimento impermeável e de um pavimento permeável. Percebe-se no primeiro caso que o escoamento pluvial é todo direcionado para jusante da área, não permitindo assim a recarga de água no solo. Diferente da superfície impermeável, o pavimento permeável permite a infiltração e armazenamento de água no solo e reduz o volume de escoamento.

Figura 1 - Efeito hidrológico de um pavimento impermeável (a) e de um pavimento permeável (b).



Fonte: adaptado FERGUSON, 2005.

As vantagens e desvantagens do uso de pavimento permeáveis em relação aos sistemas de drenagem convencional são relacionadas na tabela 1.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens do pavimento permeável.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Reduz significativamente o volume e taxa de escoamento superficial	É impróprio para áreas com grande carga de sedimento, os sedimentos podem acelerar o efeito da colmatção do pavimento;
Pode ser aplicadas em áreas já urbanizadas	Facilita a contaminação do lençol freático
Permite a recarga do lençol freático	Necessita de inspeções regulares para verificar a eficiência dos pavimentos
Promove a filtragem dos poluentes advindos do escoamento superficial	Exige manutenção periódica, para evitar o crescimento de ervas daninhas e má conservação.
Diminui o ruído	
Permite dupla utilização do espaço (exemplo: estacionamento com superfície permeável).	

Fontes: ACIOLI, 2005; WOODS-BALLARD et al., 2007; PINTO, 2011.

Assim como em Ferguson (2005), foi utilizado neste trabalho os termos: **revestimento** como sendo uma superfície aplicada sobre uma base de agregados e **pavimento** a estrutura composta por uma camada de assentamento, base de agregados e o revestimento permeável. A sub-base do pavimento é a camada de solo abaixo do reservatório (base de agregados).

Estão ilustrados no quadro 1 alguns tipos de revestimentos permeáveis que incluem asfalto poroso, concreto permeável, blocos maciços de concreto, sistemas de pavimentação de cascalho e brita, bloco de concreto vazado preenchidos com grama ou areia. Estes devem ser selecionados de acordo com o local e uso em cada projeto (FERGUSON, 2005).

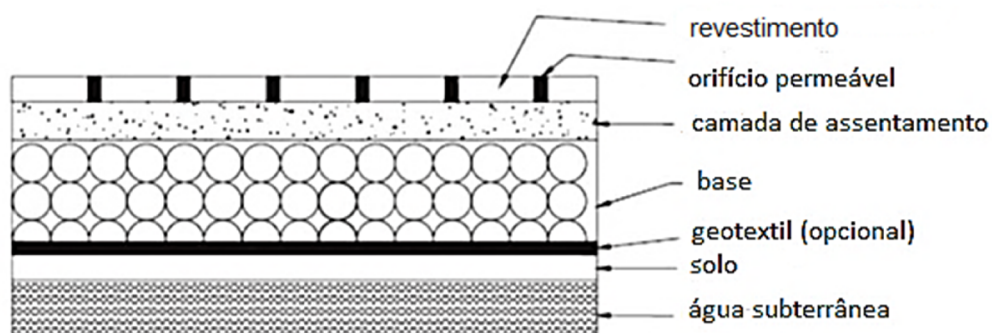
Quadro 1: Tipos, composição e ilustração de revestimentos permeáveis.

TIPO	COMPOSIÇÃO	ILUSTRAÇÃO
Pavimento poroso	Placa de concreto poroso (produzido com agregado médio e grosso - cascalho, brita, resíduo de construção civil)	
Concreto permeável	Bloco de concreto poroso.	
Bloco maciço	Mistura de agregado fino com cimento Portland	
Bloco maciço vazado	Mistura de agregado fino com cimento Portland (ou outro tipo de cimento) vazado preenchido com grama ou areia	
Geocélulas	Mais resistentes que os blocos de concreto vazado, são estruturas de plástico formando uma rede com espaços vazios que devem ser preenchidos com grama, brita ou areia.	

Fonte: Adaptado de FERGUSON, 2005.

De acordo com Scholz e Grabowiecki (2007), os revestimentos permeáveis devem ser construídos sobre uma camada de areia (camada de assentamento), uma base de material particulado (brita) e uma manta geotêxtil (opcional) sob o solo natural ou compactado, como ilustra a Figura 4.

Figura 3 - Perfil esquemático de um pavimento permeável.



Fonte: Adaptado de SCHOLZ e GRABOWIECKI 2007.

Os revestimentos permeáveis servem apenas de conduto rápido para a água pluvial chegar à base de areia e brita. A camada de brita tem a função de reservatório, sua profundidade é fator determinante na capacidade de armazenamento do pavimento, e para o dimensionamento dessa camada é levado em consideração a porosidade do material a ser utilizado (ARAÚJO, TUCCI E GOLDENFUM, 2000; CASTRO, A., 2011). Alencar (2013) utiliza o termo “perda d’água” como sendo o volume de armazenamento e as perdas de água no sistema. Essa perda d’água inclui aquela causada por infiltração no solo, por evaporação, por adsorção na superfície dos grãos e no concreto.

A camada de areia exerce função niveladora para o assentamento dos revestimentos permeáveis e a manta geotêxtil previne a ocorrência de colmatação da estrutura, mantendo a integridade estrutural e a porosidade de cada camada, impedindo o movimento de partículas menores entre as elas (SILVA, 2006).

O uso ou não de drenos para saída da água é definido de acordo com a capacidade de infiltração do solo. Em solos não compactados, onde a capacidade de infiltração é favorável, a água é capturada em sua base e infiltra-se lentamente no subsolo. Já em áreas de baixa permeabilidade, os drenos são construídos para possibilitar a saída da água para a rede pública de drenagem. Neste caso, o pavimento promove apenas o armazenamento temporário da mesma, funcionando assim como reservatório de amortecimento (GOFORTH, 1983; COLLINS, HUNT e HATHAWAY, 2006).

Os pavimentos permeáveis, assim como outras estruturas de infiltração, necessitam de uma manutenção em sua estrutura devido à colmatação por sedimentos. Este acúmulo de sedimentos depende do volume de tráfego e da existência de fontes de sedimentos próximos ao pavimento como jardins e áreas propensas a carreamentos de sólidos. Segundo UDFCD (2010) quando observada a redução da infiltração em um pavimento, os espaços vazios preenchidos com sedimentos devem ser desobstruídos, ou deve-se providenciar a substituição do pavimento.

O bom funcionamento dos pavimentos permeáveis está relacionado com a periódica manutenção dos dispositivos para preservar a sua capacidade de infiltração e armazenamento. Para remover os detritos da superfície dos pavimentos é recomendada a aspiração dos mesmos, ou o uso de sopradores e lavadoras de alta pressão (EPA, 2000; TENNIS, LEMING, AKERS, 2004; WOODS-BALLARD et al., 2007).

Além da manutenção periódica, em experiência realizada na Geórgia com pavimentos permeáveis, Ferguson (2007) mostra que uma gama de materiais porosos para pavimentação está disponível, mas atenta para o cuidado necessário na sua seleção, concepção do projeto e instalação do pavimento para obter um resultado hidrológico satisfatório e uma vida útil do material adequada.

Há alguns trabalhos que comprovam a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial, como por exemplo, Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), Acioli (2005), Moura (2005) e Alencar (2013), porém os números mais significativos são de trabalhos realizados no exterior, como os de Andersen, Foster e Pratt (1999), Collins, Hunt e Hathaway (2006), Ferguson (2007) e Hou et al. (2008).

Para Acioli (2005), a adoção de medidas de controle na fonte do escoamento superficial exige conhecimento e domínio da técnica. A utilização de dois tipos de pavimentos permeáveis instalados em um estacionamento resultou em desempenho hidráulico satisfatório com elevado controle do escoamento superficial. A eficiência dos pavimentos foi comprovada com a obtenção de coeficiente de escoamento de 0,05 para o revestimento de asfalto poroso e 0,02 para o bloco vazado. Além do monitoramento dos dados de precipitação, da capacidade de armazenamento, do escoamento superficial e da umidade do solo, a autora observou também a relação do aumento do coeficiente de escoamento ao longo do tempo com o efeito da colmatção sobre os pavimentos.

Hou et al. (2008) analisaram o escoamento superficial e subsuperficial de pavimentos permeáveis decorrente de diferentes intensidades de chuva. As experiências foram conduzidas em um sistema com pavimento impermeável e em três sistemas distintos de pavimentos permeáveis: blocos de concreto poroso com 20 cm de areia na base; bloco de concreto poroso com uma base de 10 cm de concreto poroso e 15 cm de brita; bloco de concreto poroso com uma base de 5 cm de concreto poroso e 20 cm de brita. Foram simulados quatro eventos de chuva com intensidades de 47,05 mm/h e 59,36 mm/h com duração de 40 a 120 minutos. Os resultados mostraram que em todos os sistemas houve aumento da infiltração e diminuição do escoamento superficial, com maior eficiência na redução do escoamento superficial do pavimento poroso com base de 10 cm de concreto poroso e 15 cm de brita.

Andersen, Foster e Pratt (1999) realizaram um estudo experimental com o intuito de medir o comportamento hidrológico de um estacionamento com pavimentos permeáveis. Foram medidas alterações no escoamento, no armazenamento e na evaporação, em um período de 18 meses. Neste trabalho foram usados 11 tipos de base

sobre o bloco de concreto Ceepy® (vazado). Os autores perceberam forte influência do tamanho da partícula do material da base sobre a capacidade de retenção de água pelos blocos. Concluiu-se que quanto maior o tamanho das partículas (maior granulometria) do material da base, mais fácil será a percolação da água. Além disso, os autores compararam também, as condições iniciais de cada estrutura, relacionando sua capacidade de armazenamento de água com as condições de umidade inicial. Em uma chuva simulada de 15 mm/h durante 1 hora, a estrutura seca apresentou um armazenamento de 55% do volume precipitado, enquanto na estrutura previamente úmida houve a retenção de apenas 30%. Portanto, percebe-se que a umidade da base (camada de agregados) também é fator determinante na eficiência de pavimentos permeáveis.

Collins, Hunt e Hathaway (2006) realizaram experimento em um estacionamento na Carolina do Norte (EUA) composto por quatro revestimentos permeáveis: concreto poroso, dois trechos com bloco de concreto maciço de diferentes formatos e bloco de concreto vazado preenchido com areia. O objetivo foi analisar a redução da vazão máxima de escoamento superficial e a melhora na qualidade da água pluvial. Foi observada, para todos os revestimentos, uma redução significativa do volume precipitado, a partir do monitoramento de chuvas naturais no período de junho a agosto de 2006, em comparação aos resultados obtidos em uma superfície impermeável (asfalto).

Mesmo com o crescimento do estudo sobre pavimentos permeáveis, como por exemplo, Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), Moura (2005) e Alencar (2013), seu uso no Brasil é ainda muito tímido. Apesar do governo federal por meio do “Programa 1138 – Drenagem Urbana Sustentável” promover a gestão sustentável da drenagem urbana, através de incentivos financeiros aos estados e municípios, os pavimentos são encontrados apenas em calçamentos e em áreas de baixo fluxo de veículos. Na América do Norte, segundo Ferguson (2005), muitos estados regulamentaram o uso de pavimentos permeáveis na gestão das águas pluviais urbanas, o que contribuiu com a disseminação do dispositivo. Isto auxilia na minimização dos efeitos adversos da urbanização sobre o meio ambiente.

Moura (2005) avaliou a produção do escoamento superficial e a taxa de infiltração de quatro superfícies permeáveis (grama, chão batido, bloco de concreto maciço e vazado) construídos com diferentes declividades. Foram adotadas três precipitações diferentes com tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos. Em relação ao

controle do escoamento superficial, os blocos vazados foram as estruturas mais eficientes, sendo em alguns casos mais eficientes que a superfície gramada.

A fim de verificar a eficiência de diferentes tipos de superfícies permeáveis com relação ao controle na geração do escoamento superficial. Silva (2006) realizou a simulação de chuva sobre pavimentos permeáveis revestidos com bloco de concreto maciço e vazado sobre o solo compactado ou não. Estes foram assentados em uma camada de 5 cm de areia e também a simulação em superfície de chão batido e grama, não exigiram nenhum tipo de processo construtivo. Foram analisados os efeitos da declividade e compactação do substrato. Com coeficientes de escoamento inferiores a 0,35, o revestimento com blocos vazados mostrou-se eficiente no controle do escoamento, mesmo com a compactação do seu substrato e aumento da declividade longitudinal.

Em um estudo realizado nas dependências da Escola de Engenharia Civil- UFG no município de Goiânia, Castro (2011) analisou o comportamento de três superfícies permeáveis (concreto poroso, bloco de concreto maciço e bloco de concreto vazado) construídos sobre três condições estruturais (base e sub-base) distintas, em relação ao controle de escoamento superficial. Na pesquisa simulou-se chuvas artificiais de média e alta intensidade (69 mm/h e 180 mm/h) em 18 ensaios. Além das análises quantitativas do escoamento superficial e subsuperficial, foi feita a caracterização dos solos do subleito e dos materiais utilizados e o monitoramento da umidade do solo. O autor concluiu que o trecho com melhor desempenho hidrológico foi a estrutura com maior camada de armazenamento (trecho III) com coeficientes de escoamento variando de 0 a 0,19. De modo geral, pode-se concluir que todos os revestimentos permeáveis tiveram um desempenho satisfatório na redução do escoamento superficial, pois apresentaram baixos coeficientes de escoamento (0 a 0,36).

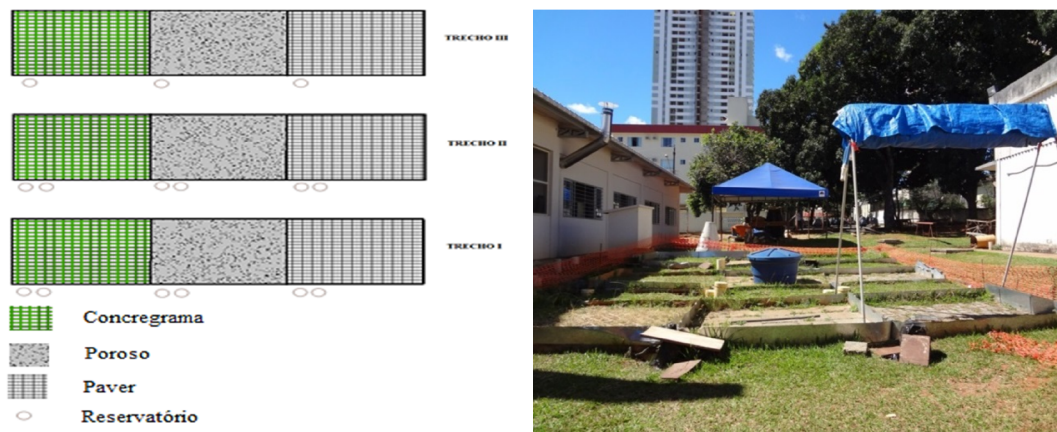
Esta pesquisa foi desenvolvida na mesma área de estudo de Castro (2011), onde foram simulados duas intensidades de chuvas distintas das aplicadas pelo autor. No capítulo abaixo segue a metodologia detalhada utilizada neste estudo.

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho consistiu na simulação de eventos de chuva sobre os diferentes revestimentos permeáveis assentados sobre substratos distintos seguido da avaliação do escoamento. A simulação de chuva foi baseada na aplicação de chuvas artificiais pré-determinadas nas superfícies de estudo, para a coleta de dados em relação ao escoamento superficial, infiltração e armazenamento.

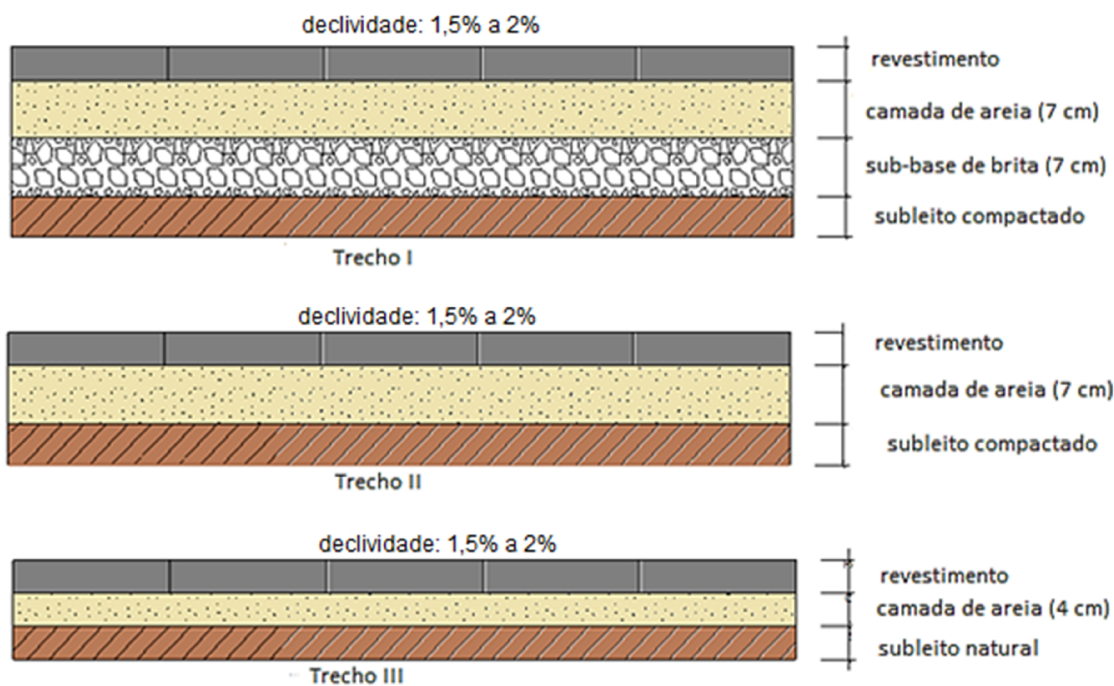
A pesquisa foi realizada em uma área de aproximadamente 40 m<sup>2</sup>, ilustrada na figura 5, localizada nas dependências da Escola de Engenharia Civil na Universidade Federal de Goiás (EEC- UFG), no município de Goiânia.

Figura 4: Área de estudo.



A construção desta área foi realizada no ano de 2010 por Castro (2011), o qual dividiu em três trechos com 9,6 m<sup>2</sup> cada, com 6 m de comprimento e 1,6 m de largura. A fim de retratar condições diferentes de assentamento, cada trecho foi construído sobre substratos diferentes com declividade variando entre 1,5% a 2 %, ilustrado na figura 6.

Figura 5: Perfil esquemático dos trechos de pavimento.



O trecho I, de acordo com Castro (2011), foi construído com base em recomendações da literatura, trata-se de uma estrutura mais reforçada para usos mais rigorosos como trânsito de veículos leves e estacionamentos. O trecho possui uma maior camada granular comparado aos outros dois trechos, e é composto por uma camada de 7 cm de areia (base) e 7 cm de brita tipo 1 (sub-base), este tipo de construção permite o armazenamento temporário da água da chuva.

O trecho II é uma estrutura intermediária entre os trechos I e III, é composto por uma base de areia de 7 cm de espessura. Tanto o trecho II quanto o I possuem um dreno perfurado (tubo de PVC) de 65 mm para o escoamento da água subsuperficial na camada de armazenamento e foram construídos sobre um manto geotêxtil e solo compactado.




Já o trecho III foi construído com o objetivo de reproduzir as condições comumente utilizadas na prática de construção de calçamentos. Este trecho possui uma base de 4 cm de areia sob o solo natural, sem o uso de dreno.

A declividade média em todos os trechos foi de 1,5%, no sentido do reservatórios de PVC (utilizados para a coleta de água), esse valor segundo Castro (2011) foi escolhido de acordo com o Código de Obras de Goiânia, que regulamento uma declividade máxima de 3%.

Em cada trecho foram assentados os três tipos de revestimentos: Paver (bloco pré-moldado de concreto maciço), Concregrama (bloco pré-moldado de concreto

vazado) e placas de concreto poroso (ilustrados no quadro 2), totalizando uma área de aproximadamente 3,2 m<sup>2</sup> (2 x 1,6 m) para cada tipo. Portanto, a área de estudos conta com nove condições experimentais distintas.

Quadro 2: Tipos de revestimento permeável utilizado e suas dimensões.

<b>Revestimento</b>	<b>Dimensões (C x L x E) (cm)</b>	<b>Usos</b>	<b>Ilustração</b>
Bloco pré-moldado maciço do tipo “Paver”	20 x 10 x 4	Calçadas, estacionamentos, praças e áreas externas.	
Bloco pré-moldado vazado do tipo “Concregrama”	50 x 50 x 10	Calçadas, estacionamentos e áreas externas.	
Placa de concreto poroso	40 x 40 x 6	Calçadas e áreas externas.	

Legenda: C- comprimento; L- largura e E- espessura.

Fonte: adaptado de Castro, 2011.

Segundo Castro (2011), para a escolha desses pavimentos foi levada em consideração a demanda no mercado. Os pavimentos do tipo Paver e o concreto poroso são comumente utilizados em calçadas e o concregrama é frequentemente visto em estacionamentos.

## 4.2 Experimento em campo

### 4.2.1 Determinação das intensidades de chuva

Antes de simular o evento de chuva propriamente dito, houve a necessidade da preparação da área experimental, que consistiu na limpeza dos pavimentos e retirada de plantas que cresceram no local e de poeira.

Para a determinação das intensidades de chuvas a serem empregadas nos pavimentos, utilizou-se a equação de chuva (equação i-d-f) para a cidade de Goiânia (equação 6) proposta por Costa et al. (2007). Foram definidas chuvas de intensidade constante e com duração de 30 e 60 minutos, estas durações foram escolhidas por serem intermediárias as utilizadas por Castro (2011), que foram de 15 e 45 minutos.

Para a determinação do tempo de retorno baseou-se no tempo de retorno utilizado em obras de micro-drenagem de acordo com o Manual de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano (SMDU, 2012), resultando no quadro 3, que apresenta o resultado das intensidades em mm/h, o tempo de retorno escolhido, em anos e as durações dos eventos de chuva selecionados, em minutos.

$$i = \frac{56,7928}{(t+24,8)^{0,974711}} \left[ T^{0,1471 + \frac{0,22}{T^{0,09}}} \right]^{0,6274} \quad \text{Válida para } 1 \text{ ano} \leq T \leq 8 \text{ anos} \quad (6)$$

Onde:

i – intensidade de chuva (mm/min);

t – duração da chuva (min);

T – período de retorno (anos).

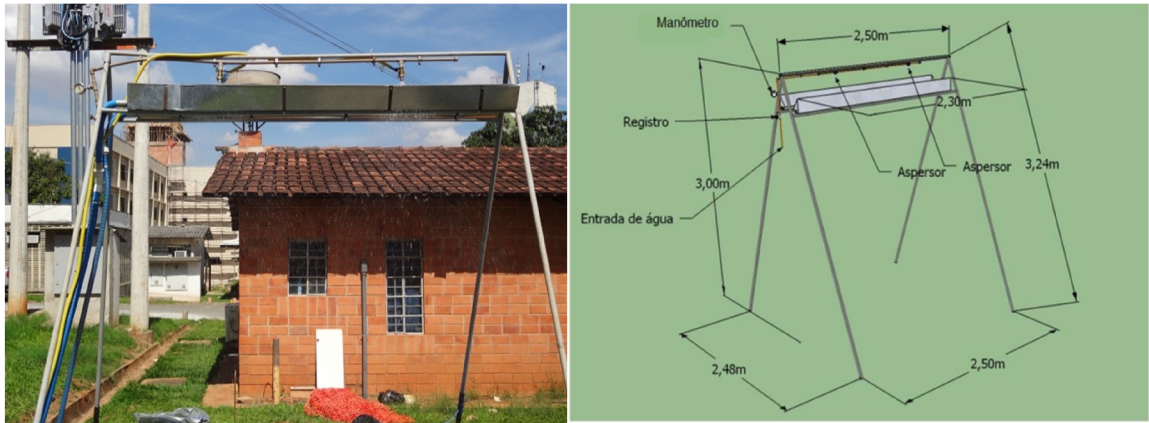
Quadro 3: Intensidades de chuva.

DURAÇÃO (min.)	TEMPO DE RETORNO (anos)	INTENSIDADE DE CHUVA (mm/h)
30	5	97,00
60		63,00

#### 4.2.2 Simulador de chuva

Com o objetivo de simular os eventos de chuva utilizou-se o simulador de chuva desenvolvido por Sousa Junior (2011). O equipamento é composto por duas unidades: uma de aspersão e outra de suporte. O simulador é equipado com dois aspersores, um manômetro analógico ligado à tubulação de entrada da água, registro de gaveta de 1/2" e solenoides para o controle da intensidade de chuva. A estrutura do simulador está ilustrada na Figura 7.

Figura 6: (a) simulador de chuva; (b) desenho esquemático do simulador de chuva.



Fonte: SOUSA JUNIOR, 2011.

a

b

Os aspersores são acionados por uma placa única, que ligada ao software livre Arduino Duemilnove possibilita fazer a programação da abertura e fechamento do dispositivo de acordo com a intensidade de chuva desejada. A relação entre a intensidade de chuva calculada por meio do método i-d-f e o tempo de abertura e fechamento das válvulas no simulador de chuva é expressa pela equação 7 (SOUSA JUNIOR, 2011).

$$I_c = 106,1046 + 22,5978t_a - 32,1052t_f - 1,4662t_a^2 + 2,3096t_f^2 + 0,4107t_a t_f \quad (7)$$

Onde:

$I_c$  - intensidade de chuva (mm/h).

$t_a$  - tempo de abertura das válvulas solenoides (s).

$t_f$  - tempo de fechamento das válvulas solenoides (s).

O modelo é válido para:  $0,5 \leq t_a \leq 8,0$  e  $0,5 \leq t_f \leq 8,0$  segundos.

Para as intensidades utilizadas neste trabalho foram determinados, por meio da ferramenta Solver do Excel 2010, tempos de abertura ( $t_a$ ) e de fechamento ( $t_f$ ) de 3,2 e 5,6 segundos, respectivamente, para a chuva de 63 mm/h e  $t_a = 1,5s$  e  $t_f = 1,4$  segundos para o evento de chuva de 97 mm/h.

Para a verificação se a chuva simulada condizia com a chuva calculada, foi realizado um procedimento que consistiu em comparar o volume de chuva simulada com o volume esperado para a área, intensidade e duração de chuva. Para essa

verificação foram coletados o volume de água precipitado em uma superfície impermeável e em seguida, após os devidos cálculos, os valores foram comparados com a intensidade calculada.

Neste processo de verificação do simulador foi utilizada uma lona acima da célula de pavimentação para torná-la impermeável. Foram simuladas chuvas com a duração de 3 minutos em três repetições, onde foi coletado o volume de escoamento em um reservatório vertical (tubo de PVC 200 mm) (Figura 8). O volume escoado foi calculado por meio da medição da altura total da lâmina d'água com o auxílio de um sensor de nível a qual foi multiplicada pela área da seção transversal do reservatório. A intensidade real foi calculada utilizando a média dos volumes coletados em cada repetição. A intensidade real ( $I_r$ ) precipitada foi calculada utilizando a equação 8 proposta por Sousa Junior (2011).

$$I_r = \left( \left( \frac{V}{A} \right)^{-t} \right) * 60 \quad (8)$$

Onde:

$I_r$  - intensidade real da chuva simulada (mm/h);  
 $V$  - volume coletado (L);  
 $A$  - área de cada trecho (neste caso 3,2 m<sup>2</sup>) (m<sup>2</sup>);  
 $t$  - duração do evento simulado (min).

Para a simulação de eventos de chuva, Sousa Junior (2011) recomenda que a pressão a ser utilizada nos ensaios seja de 80 kPa, pois após a realização de testes, observou-se que nestas condições o tamanho das gotas se assemelham à de chuvas naturais. Por esta razão utilizou-se esta pressão de trabalho.

Figura 7: (a) preparação do simulador para a sua verificação; (b) reservatório vertical para coleta de água.



A água escoada foi encaminhada para um tubo de PVC de 200 mm enterrado no solo (figura 8b), onde foi realizado o registro das alturas da lâmina d'água por meio de um sensor de nível da marca Onset modelo U20-001-01 (Figura 9). O registro de dados foi feito em intervalos de 5 segundos. Por meio desse registro, foi possível realizar o cálculo do volume escoado para cada reservatório.

Figura 8: Sensor de nível de água modelo U20-001-01.



#### 4.2.3 Ensaios nos pavimentos

Após a verificação do simulador de chuva, as intensidades reais obtidas foram de 100,8 mm/h para a chuva com duração de 30 minutos e 64,2 mm/h para o evento com duração de 60 minutos.

Os ensaios sobre os pavimentos permeáveis foram feitos em duplicata, nos meses de fevereiro a setembro de 2013 e durante este período foram observadas chuvas naturais apenas nos meses de fevereiro e março. Primeiramente fez-se a simulação da precipitação de 100,8 mm/h e duração de 30 minutos e posteriormente a de 64,2 mm/h com duração de 60 minutos, obedecendo ao intervalo de um mês entre as duas intensidades. No total, foram feitas 36 simulações, 18 para cada intensidade de chuva, respeitando um intervalo de recuperação do solo de no mínimo 24 horas para cada pavimento.

Para a análise do comportamento dos pavimentos permeáveis foram avaliadas as variáveis envolvidas no balanço hídrico, divididas em variáveis de entrada e de saída.

A variável de entrada é a precipitação simulada sobre os pavimentos e as variáveis de saída correspondem ao escoamento superficial, escoamento subsuperficial e infiltração. Nos hidrogramas registrou-se a vazão de pico, tempo de pico, volume escoado e foi calculado o coeficiente de escoamento (para a análise da capacidade de redução do escoamento superficial de cada pavimento).

A capacidade de armazenamento máximo do reservatório (base do pavimento) corresponde ao volume máximo de água que o pavimento permeável é capaz de reter

em sua estrutura. Essa capacidade depende da altura da base e do índice de espaços vazios do agregado que a compõe. O cálculo da capacidade de armazenamento máximo ( $V_{\text{máx}}$ ) em cada camada foi calculado com base na porosidade do material que o constitui (equação 9):

$$H = \frac{V_{\text{máx}}}{\eta} \quad (9)$$

Onde: H - altura da camada de armazenamento (mm);

$V_{\text{máx}}$  - volume armazenado (mm);

$\eta$  - porosidade do material.

O cálculo da infiltração ao longo do tempo foi realizado a partir da diferença entre os volumes precipitados e escoados superficialmente, dividida pelo intervalo de tempo, não foram computados as perdas de água por evaporação. Com o propósito de quantificar os parâmetros de infiltração da equação de Horton, foram feitos ajustes modelo matemático de infiltração aos dados observados. Utiliza-se o método dos mínimos quadrados, buscando-se a minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os valores observados e os valores fornecidos pelo modelo. Para o melhor ajuste da curva foi feito a retirada dos valores máximos e mínimos obtidos.

O volume precipitado foi calculado pelo produto da intensidade da precipitação pela duração da chuva e pela área.

Além da quantificação dos escoamentos, neste estudo também foi realizado o monitoramento da umidade do solo por meio de sensores de umidade da marca ECH2O – EC-5, com precisão de  $\pm 3\%$  instalados previamente nos trechos onde o evento de chuva foi simulado. Foram colocados dois sensores na base de cada pavimento com profundidades de 4 e 7 cm, os quais foram conectados a um *data logger* modelo U-30 da Onset, para o registro da umidade (expressa em  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) por um período de até duas horas após o término de cada experimento. O gráfico da umidade do solo foi determinado por meio da média aritmética simples dos dados obtidos nos dois sensores.

A medição do teor de água no solo é importante para avaliar as condições do solo no início e no decorrer do experimento com a eficiência de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial. Este monitoramento é também importante na análise dos processos que regem o movimento da água no pavimento e no solo.

A duração total dos experimentos foi de aproximadamente 4 horas, para cada área.

### 4.3 Análise do desempenho hidrológico

Para a análise do desempenho hidrológico nas nove parcelas experimentais, foram quatro os indicadores de avaliação de desempenho dos pavimentos. Como em muitos trabalhos, o desempenho hidrológico dos pavimentos foi analisado segundo o coeficiente de escoamento **C** (Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), Silva (2006), Bruno (2011), por exemplo). Além dessa análise, neste trabalho foi utilizado também o percentual de água escoada total, em relação ao volume precipitado -  $V_{tesc}/V_{prec}$ . Sendo que  $V_{tesc}$  corresponde ao somatório dos volumes de escoamento superficial e subsuperficial. O percentual  $V_{tesc}/V_{prec}$  foi calculado com base na seguinte equação:

$$\frac{V_{tesc}}{V_{prec}} = \frac{(V_{esc} + V_{sub}) * 100}{V_{prec}} \quad (10)$$

Foi calculada a porcentagem de  $V_{tesc}/V_{prec}$  para cada ensaio e em seguida retirado a média desses resultados.

Também foram analisados a relação entre o volume armazenado ( $V_{arm}$ ) e o volume precipitado –  $V_{arm}/V_{prec}$ . O  $V_{arm}$  é o resultado da diferença entre o  $V_{esc}$  e  $V_{sub}$ . Neste trabalho, o volume de armazenamento ( $V_{arm}$ ) implica na soma do volume armazenado e também nas perdas ocorrida no sistema, por armazenamento em depressões, evaporação e interceptação.

O **Te** (tempo de entrega) é o tempo necessário para que a onda de escoamento, gerada pela precipitação, atinja a seção de controle da bacia, neste caso, implica no tempo que o dispositivo compensatório leva para enviar a água pluvial para os sistemas de rede de drenagem pública. O **Te** é o resultado da média entre os dois ensaios do **te** (tempo de embebição) para o escoamento superficial e para o escoamento subsuperficial a média entre os ensaios dos tempos do início da sua produção.

Além disso, foram analisados os parâmetros obtidos no ajuste dos dados experimentais no modelo de Infiltração Horton,  $k$ ,  $f_c$  e  $f_0$ .

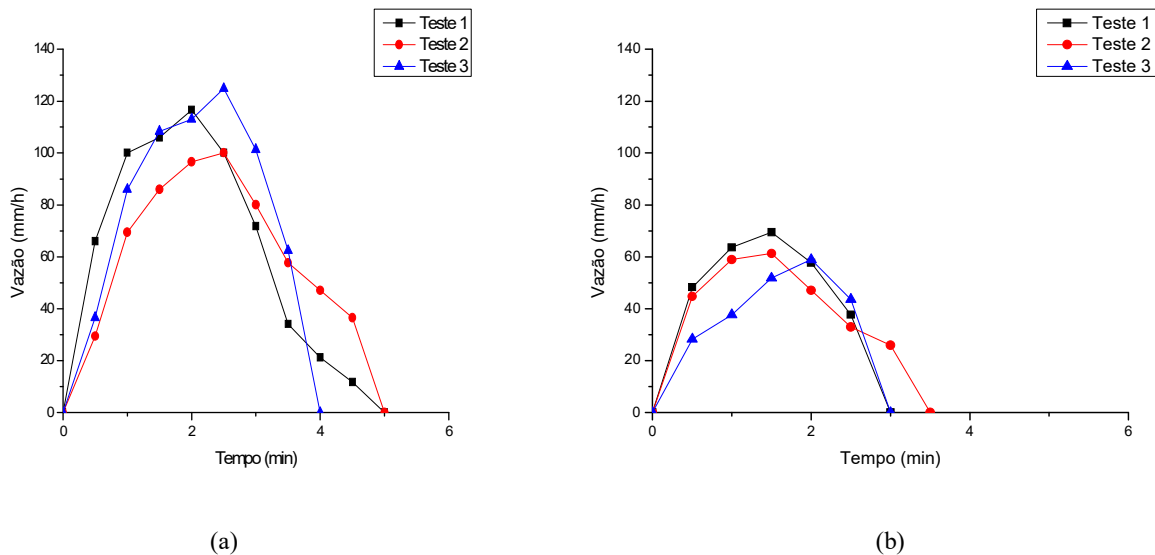
Para uma melhor análise foram plotados gráficos comparando as duas intensidades utilizadas, para cada pavimento e trecho (Paver I, Paver II, Paver III, Poroso I, Poroso II, Poroso III, Concregrama I, Concregrama II e Concregrama III).

Em síntese, menores valores de  $C$ , menores valores de  $V_{tesc}/V_{prec}$  e maiores valores de  $V_{arm}/V_{prec}$  significam um melhor desempenho do pavimento analisado. Isto significa que o pavimento permite a infiltração e o armazenamento da água minimizando assim o escoamento. E ainda, segundo Alencar (2013), a análise do  $T_e$  permite a comparação do que seria um “tempo de entrega” da água de chuva ao sistema público de drenagem urbana, ou seja, quanto maior a porcentagem de água escoada maior a celeridade do escoamento a ser recebido pela rede de drenagem.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes da simulação dos eventos sobre os pavimentos permeáveis realizou-se a verificação do simulador de chuva. Esse processo consistiu em comparar a intensidade de chuva programada com a intensidade efetivamente precipitada. A figura 10 ilustra os hidrogramas obtidos na verificação do simulador sobre uma área impermeável.

Figura 9: Hidrograma de verificação do simulador de chuva (a)  $i = 97 \text{ mm/h}$  e (b)  $i = 63 \text{ mm/h}$ .



No quadro 4 são apresentados os volumes precipitados, a intensidade programada (calculada por meio da equação de chuva do município de Goiânia), a intensidade simulada, a intensidade média e o desvio padrão amostral entre a intensidade prevista e a média. A intensidade média é calculada através da média aritmética simples das repetições do teste de verificação e este resultado foi utilizado para a análise dos resultados dos experimentos.

Quadro 4: Resultado dos testes realizados para a calibração do simulador de chuva.

Intensidade Programada (mm/h)	Teste	Volume (L)	Intensidade Simulada (mm/h)	Intensidade Média (mm/h)	Desvio-padrão (mm/h)
97,00	1	15,87	99,20	100,80	2,68
	2	16,49	103,10		
	3	16,02	100,10		
63,00	1	10,70	67,10	64,20	0,85
	2	10,40	64,80		
	3	9,40	60,70		

A partir destes resultados adotou-se para a análise dos dados as intensidades de 100,80 mm/h para a chuva com duração de 30 minutos e 64,20 mm/h para duração de 60 minutos, pois eram estes os valores médios efetivamente precipitados pelo simulador.

Para melhor apreciação dos resultados, optou-se pela sua apresentação de acordo com a camada de assentamento e base, ou seja, os resultados dos hidrogramas de escoamento superficial, subsuperficial, curva de infiltração, saturação do solo e armazenamento serão apresentados e discutidos por trecho (trecho I, II e III). Em seguida, foi realizada uma análise de desempenho hidrológico dos pavimentos de acordo com o item 4.3.

Os resultados obtidos foram analisados comparando, principalmente, com os trabalhos desenvolvidos por Bruno (2011), Castro (2011), Moura (2005) e Silva (2006), pois o desenvolvimento destas pesquisas foi em condições semelhantes a este experimento (tabela 2).

A pesquisa de Moura (2005) não apresentou escoamento superficial no bloco de concreto vazado para as intensidades de chuva de 84 mm/h e 120 mm/h, foi necessário uma chuva de intensidade maior para produzir esse escoamento.

Tabela 2: Resumo dos principais resultados obtidos por Bruno (2011), Moura (2005), Silva (2006) e Castro (2011).

<b>Autor</b>	<b>Revestimento</b>	<b>i (mm/h)</b>	<b>Vprec (L)</b>	<b>Vesc (L)</b>	<b>C</b>
BRUNO (2011)	Bloco de concreto maciço	79,0	55,3	12,01	0,21
		121,0	84,7	46,96	0,55
	Bloco de concreto vazado	79,0	55,3	0,65	0,01
		121,0	84,7	19,12	0,23
MOURA (2005)	Bloco de concreto maciço	84,0	50,44	6,77	0,13
		120,0	60,0	41,63	0,69
	Bloco de concreto vazado*	156,0	143,0	50,57	0,35
SILVA (2006)	Bloco de concreto maciço	84,0	49,04	25,91	0,53
		120,0	60,05	41,63	0,69
	Bloco de concreto vazado	84,0	28,02	17,68	0,63
		120,0	40,03	30,53	0,76
CASTRO (2011)	Paver I	69,0	155,25	0,0	0,0
		180,0	135,0	26,59	0,19
	Poroso I	69,0	155,25	0,0	0,0
		180,0	135,0	0,0	0,0
	Concregrama I	69,0	155,25	0,0	0,0
		180,0	135,0	0,38	0,0
	Paver II	69,0	155,25	49,11	0,31
		180,0	135,0	120,11	0,89
	Poroso II	69,0	155,25	0,0	0,0
		180,0	135,0	4,02	0,03
	Concregrama II	69,0	155,25	0,0	0,0
		180,0	135,0	0,05	0,0
	Paver III	69,0	155,25	33,50	0,21
		180,0	135,0	48,58	0,36
	Poroso III	69,0	155,25	12,19	0,07
		180,0	135,0	36,70	0,27
	Concregrama III	69,0	155,25	35,35	0,22
		180,0	135,0	32,65	0,24

### - Trecho I

Neste item são apresentados os resultados das superfícies composta por bloco pré-moldado de concreto maciço (Paver), concreto Poroso e bloco pré-moldado de concreto vazado preenchido com areia e grama (Concregrama) assentadas sob o trecho I. Como já dito, o trecho I apresenta uma maior camada de armazenamento, com 14 cm

de espessura em sua estrutura, composta de 7 cm de brita tipo1 e 7 cm de areia. Esta estrutura foi construída sobre o solo compactado e com o uso de manta geotêxtil.

Primeiramente serão exibidos os resultados dos ensaios para a chuva com intensidade de 100,8 mm/h e em seguida a intensidade de 64,2 mm/h, com duração de 30 e 60 minutos respectivamente.

No quadro 5 são ilustrados os resultados das simulações para os três pavimentos com intensidade de 100,80 mm/h.

Quadro 5: Resultados das simulações no trecho I com intensidade de 100,80 mm/h e duração 30 min.

Parâmetros	Paver		Poroso		Concregrama	
	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II
<b>Vprec (L)</b>	161,30	161,30	161,30	161,30	161,30	161,30
<b>Vesc (L)</b>	13,27	13,73	s/r	s/r	s/r	s/r
<b>Varm (L)</b>	130,73	138,43	105,19	160,95	121,06	161,30
<b>Vsub (L)</b>	17,31	9,14	56,11	0,35	40,24	s/r
<b>Qp (mm/h)</b>	24,74	29,45	88,94*	28,27*	101,91*	s/r
<b>Tp (min.)</b>	9	30	30	29	32	s/r
<b>C</b>	0,08	0,09	-	-	-	s/r

s/r =sem registro \* Qp subsuperficial

Os termos Vprec, Vesc, Varm, Vsub, Qp, Tp e C são, respectivamente, volume precipitado, volume escoado superficialmente, volume armazenado, volume escoado subsuperficialmente, vazão de pico, tempo de pico e coeficiente de escoamento. Esses parâmetros foram obtidos por meio da série temporal registrada pelo do sensor de nível, da transformação do nível de água em volume e vazão.

As vazões de pico representadas no quadro 5 são: vazão de pico superficial para ensaios onde há a produção de escoamento superficial e vazão de pico subsuperficial quando o ensaio sobre o pavimento apresentar apenas o escoamento subsuperficial.

O Varm, volume armazenado, representa a quantidade de água armazenada nos interstícios do solo e também nas depressões da superfície do pavimento.

Analisando-se o quadro 5 percebe-se que a maior parte do volume precipitado foi armazenado, proporcionando assim um retardo significativo no sistema de drenagem. Neste trecho praticamente não houve escoamento superficial, apenas o revestimento Paver apresentou um pequeno escoamento. Comportamento semelhante foi verificado por Castro (2011), que na simulação da chuva de maior intensidade (180

mm/h) foram observados que a maior parte do volume precipitado infiltrou e ficou armazenado.

A figura 11 apresenta os hidrogramas dos escoamentos e a curva de infiltração na simulação do evento de chuva com intensidade de 100,80 mm/h e duração de 30 minutos, do primeiro e segundo ensaio. A figura 12 ilustra a evolução da umidade da base no tempo.

A oscilação dos dados observada em todos os hidrogramas deve-se a variação da pressão devido à abertura e fechamento do aspersor durante a simulação de chuva que reflete em uma variação no nível da lâmina no reservatório registrado pelo sensor de nível. Esta oscilação também foi constatada por Silva (2006).

Figura 10: Hidrogramas e infiltração do pavimento Paver com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

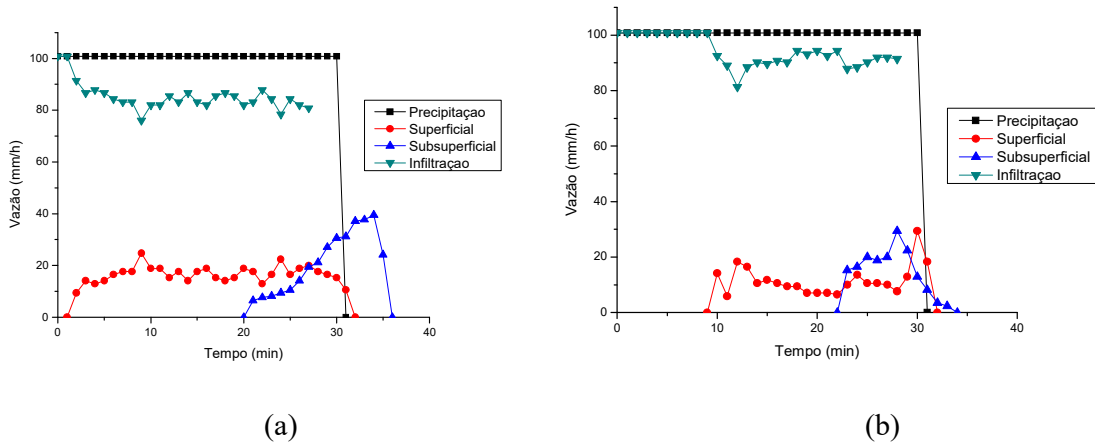
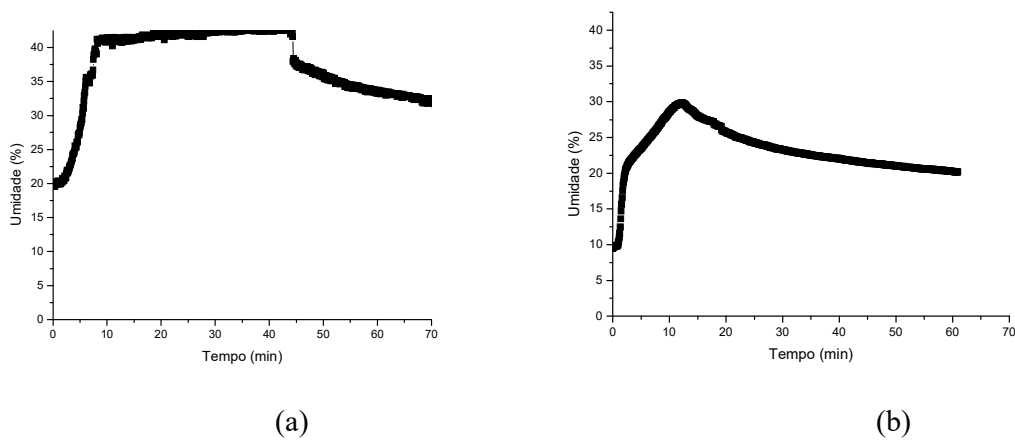


Figura 11: Evolução da umidade no tempo para o pavimento Paver com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



A produção do escoamento superficial nos ensaios ocorreu quase no início da precipitação para o primeiro e aos 9 minutos no segundo. Este resultado, em média, é similar ao encontrado por Castro (2011) em que o tempo de embebição ( $t_e$ ), que compreende o início da precipitação até o início do escoamento superficial, foi de aproximadamente de 3 minutos. Acredita-se que o retardo no surgimento do escoamento superficial entre os dois ensaios seja explicado pela condição inicial de umidade na camada subjacente ao revestimento permeável. O primeiro ensaio foi realizado no mês de fevereiro onde foram observadas chuvas naturais e apresentou uma umidade média inicial de 20,22% e no segundo, realizado no período seco, em agosto, esse valor foi de apenas 9,47% (figura 12), pois a umidade inicial da estrutura influencia na capacidade de infiltração e conseqüentemente na produção do escoamento.

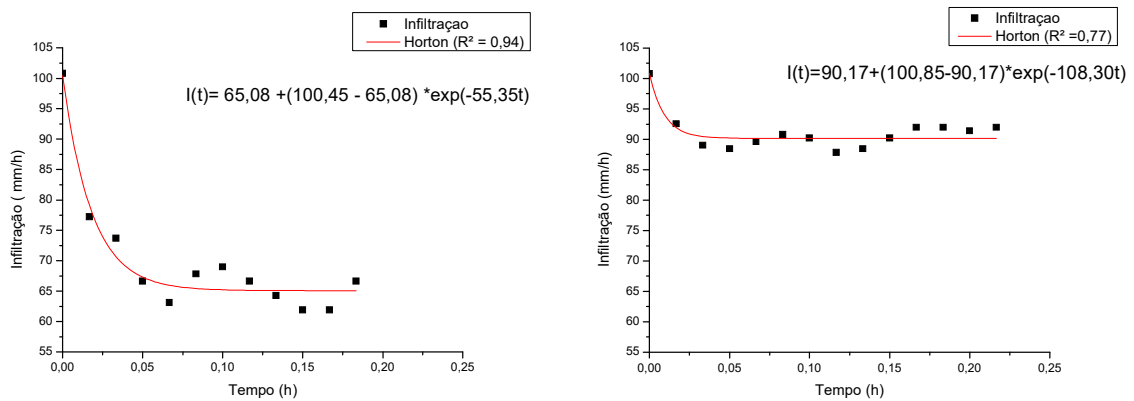
Percebe-se que no primeiro ensaio o pico de umidade perdurou por cerca de 35 minutos em um patamar mais alto, diferente do segundo ensaio que apresentou valores mais baixos. Este resultado pode ser relacionado com o volume do escoamento subsuperficial que foi maior no primeiro ensaio com 17,31 L em relação ao segundo (9,14 L). Este resultado sugere que havia no primeiro ensaio maior umidade na camada de armazenamento em relação ao segundo ensaio. Castro (2011) em sua pesquisa, a porcentagem do volume subsuperficial escoado, assim como este trabalho, também foi baixa, apresentando 9,62 % do volume precipitado.

No que se refere ao escoamento subsuperficial, verificou-se que o mesmo começou a cerca de 20 e 25 minutos depois do início da precipitação, com um volume de escoamento de apenas 9,14 L (resultado obtido por meio da altura da lâmina d'água no reservatório e confirmado pelo cálculo da integral da vazão pelo tempo do hidrograma) para o segundo ensaio. Pinto (2011) atribui essa característica positiva no retardo do escoamento subsuperficial à permeabilidade do revestimento e também da porosidade efetiva dos materiais constituintes da estrutura de armazenamento.

O volume armazenado nos dois ensaios foi similar apresentando um volume médio de 134,58 L, portanto observa-se que a maior parte do volume precipitado foi armazenada no pavimento. Esse resultado mostra o desempenho positivo do pavimento, pois há atenuação do pico de vazão do escoamento. Castro (2011) também obteve resultados positivos em relação ao volume armazenado, em seu trabalho houve o armazenamento de mais de 70 % do volume precipitado.

O ajuste do modelo de infiltração Horton aos dados experimentais é ilustrado na figura 13, para o primeiro e segundo ensaios, representados nesta ordem.

Figura 12: Ajuste dos dados de infiltração para o revestimento Paver no trecho I com simulação de 100,8 mm/h.



Em termos de coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o primeiro ensaio apresentou um resultado melhor ( $R^2 > 0,90$ ) que o segundo ( $R^2 = 0,77$ ). A diferença entre os dois dados pode estar relacionada a condições iniciais da base e revestimento, ou seja, a umidade inicial causa interferência na taxa de infiltração inicial.

Ambos os ensaios apresentaram a constante de decaimento ( $K$ ) alta,  $55,35 \text{ h}^{-1}$  e  $108,30 \text{ h}^{-1}$  para o primeiro e segundo ensaio, o valor elevado de  $K$ , indica um menor tempo para atingir a infiltração final. O elevado valor de  $K$  indica, segundo Pinheiro, Teixeira e Kaufmann (2009), que a capacidade de infiltração do solo reduz-se mais rapidamente em comparação a valores de  $K$  reduzido.

De acordo com Moura (2005), a variação dos resultados de  $K$  em seu trabalho, de  $40 \text{ h}^{-1}$  a  $100 \text{ h}^{-1}$ , na simulação de chuva sobre o revestimento de bloco de concreto maciço sob o solo compactado, ocorreu devido a diferença do fluxo de água no interior do solo em cada simulação causada pela anisotropia e a heterogeneidade do solo.

Nas simulações realizadas no pavimento Poroso para este trecho não foi observado escoamento superficial apenas o escoamento subsuperficial, demonstrando que mesmo com uma alta intensidade o pavimento é capaz de reduzir o escoamento superficial. Na figura 14 são ilustrados os hidrogramas do escoamento subsuperficial.

Figura 13: Hidrogramas do pavimento Poroso com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

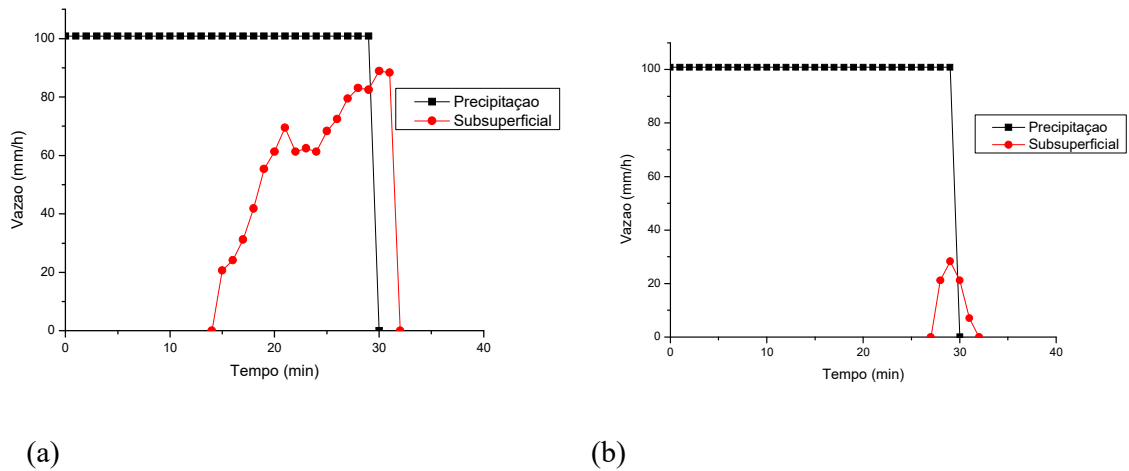
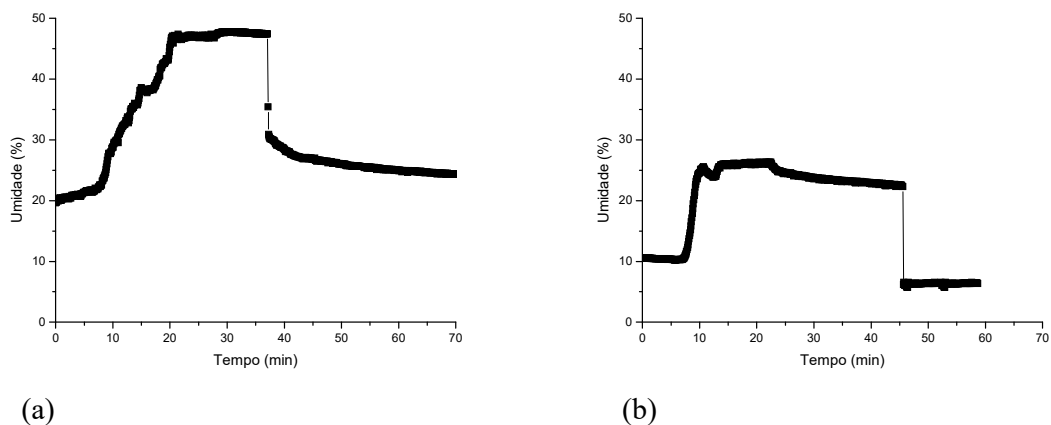


Figura 14: Evolução da umidade do solo no pavimento Poroso com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Na figura 14, nota-se o comportamento dos ensaios bem distintos um do outro, enquanto que no primeiro apresentou uma vazão máxima do escoamento subsuperficial de 88,94 mm/h com volume de 56,11 L, no segundo ensaio foi de apenas 28,27 mm/h volume de apenas 0,35 L. Difere-se também o início do escoamento superficial, no primeiro ensaio a produção do escoamento ocorreu aproximadamente aos 15 minutos e no segundo ensaio foi de aproximadamente 25 minutos do início da simulação de chuva.

Nesta unidade obteve-se um armazenamento médio entre os dois ensaios de aproximadamente 82 % do volume precipitado. Para Castro (2011) os experimentos

nesta unidade foram semelhantes ao obtido neste trabalho, a maior parte do volume precipitado foi armazenada (61,42 %).

A diferença entre o volume escoado subsuperficialmente e vazão máxima nos dois ensaios, pode ser explicada pela ocorrência de chuva natural no dia anterior ao dia do primeiro ensaio, conferindo uma umidade média superior do solo no primeiro em relação ao segundo ensaio, como pode ser observado na figura 15. Acioli (2005) mediu a umidade do solo por meio de guias de onda instaladas a 10 cm abaixo do revestimento permeável. O resultado obtido em sua pesquisa corrobora com o obtido neste trabalho em que a baixa umidade inicial da camada subjacente ao revestimento influencia na capacidade de infiltração do mesmo e no volume de armazenamento nesta camada, ou seja, no segundo ensaio a umidade inicial menor conferiu uma maior capacidade de retenção de água no solo, conseqüentemente maior armazenamento e menor volume escoado superficialmente.

Batista, Nascimento e Barraud (2005) afirmam que quando o solo fica saturado ele atinge a fase 3 no processo de infiltração do solo, que corresponde a fase onde há o escoamento horizontal em meio saturado e a estrutura passa a funcionar como um dispositivo de injeção e não mais de infiltração, o que justifica o escoamento subsuperficial no primeiro ensaio.

Assim como o pavimento Poroso, a superfície de Concregrama não apresentou escoamento superficial para ambos os ensaios. Na figura 16 é ilustrado o hidrograma do escoamento subsuperficial.

Resultado semelhante foi obtido por Acioli (2005) e Castro et al. (2012), em que a maioria dos eventos monitorados em suas pesquisas não apresentaram escoamento na superfície do revestimento de bloco vazado. Caso similar também foi verificado no trabalho desenvolvido por Castro (2011), que foi registrado um escoamento superficial insignificante sobre o pavimento para a chuva de maior intensidade (180 mm/h) e houve apenas a formação de escoamento subsuperficial na de menor magnitude (69 mm/h), evidenciando assim a alta capacidade de redução do escoamento superficial pelo pavimento.

Figura 15: Hidrogramas do pavimento Concregrama com simulação de 100,8 mm/h.

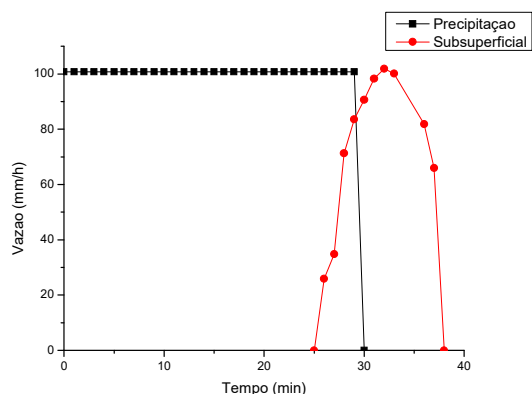
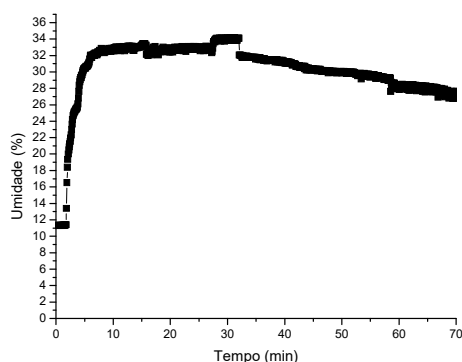


Figura 16: Evolução da umidade do solo no pavimento Concregrama com simulação de 100,8 mm/h.



Para o Concregrama observou-se um resultado esperado, pois no primeiro ensaio realizado no mês de fevereiro com o pavimento úmido observou-se um volume de escoamento subsuperficial de 40,24 L (quadro 5, pág. 48) enquanto no segundo ensaio com o pavimento menos úmido obteve-se um escoamento insignificante. O menor volume escoado subsuperficialmente também está relacionado com as condições da grama de preenchimento dos blocos, pois no segundo ensaio foi observado um aumento da densidade da grama na área, o que resultou no aumento da interceptação, absorção e do armazenamento em depressões da água. Durante a realização do ensaio o armazenamento em depressões e interceptação de água foi visível.

A umidade média inicial da base foi de 11,29% chegando ao pico de aproximadamente 35% (figura 17), percebe-se que o pico perdurou por mais tempo, durante 30 minutos e seu decréscimo foi pouco marcante, que segundo Castro (2011), indica uma melhor capacidade de retenção de água do pavimento.

Para a intensidade simulada de 100,80 mm/h, o pavimento do tipo Concregrama foi o que obteve melhor resultado em termos de retenção de água, visto que mais de 87% do volume precipitado ficou armazenado (Varm- 141,18 L) na camada de areia e brita sob o revestimento. O segundo melhor desempenho em termos de volume armazenado foi do Paver e em seguida o revestimento Poroso com os volumes armazenados médio de 134,58 L e 133,07 L, respectivamente.

Detectou-se visualmente ao longo dos experimentos que houve a formação de armazenamento de água sobre a superfície do revestimento. Esse padrão é corroborado por Acioli (2005), Castro et al. (2012) e Bruno, Amorim e Silveira (2013) que afirmam que a parte vazada deste tipo de revestimento pode servir como um pequeno reservatório e que também a interceptação vegetal contribui para a ausência de escoamento superficial.

As simulações no trecho I para o evento de chuva de 64,20 mm/h, com duração de 60 minutos, ocorreram nos meses de junho a setembro de 2013. No quadro 6 é apresentado o resumo dos resultados dos ensaios realizados.

Quadro 6: Resultados das simulações no trecho I com intensidade de 64,20 mm/h e duração 60 min.

Parâmetros	Paver		Poroso		Concregrama	
	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II
<b>Vprec (L)</b>	205,40	205,40	205,40	205,40	205,40	205,40
<b>Vesc (L)</b>	27,11	54,29	s/r	s/r	s/r	s/r
<b>Varm (L)</b>	120,64	102,20	205,40	192,58	164,09	167,17
<b>Vsub (L)</b>	57,65	48,91	s/r	12,82	41,31	38,21
<b>Qp (mm/h)</b>	17,67	25,92	s/r	12,96*	28,86*	32,99*
<b>Tp (min.)</b>	23	37	s/r	50	59	55
<b>C</b>	0,13	0,26				

s/r= sem registro \* Qp subsuperficial

Constata-se pelo quadro 6, que assim como na intensidade de 100,8 mm/h, apenas o pavimento com o revestimento Paver gerou escoamento superficial. A maior parte do volume de água precipitado foi armazenada.

As figuras 18, 21 e 23 apresentam os hidrogramas dos escoamentos e a curva de infiltração na simulação do evento de chuva do primeiro e segundo ensaio, com intensidade de 64,20 mm/h e duração de 60 min. As figuras 19, 22 e 24 a evolução do grau de saturação do solo, sendo representado nestas figuras o primeiro e segundo ensaio respectivamente.

Figura 17: Hidrogramas e infiltração do revestimento Paver (trecho I) com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

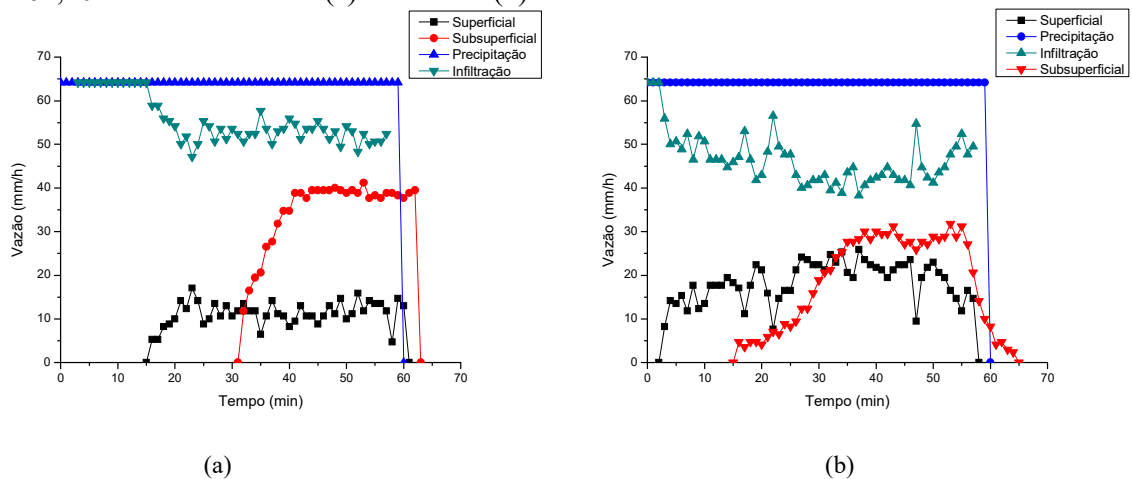
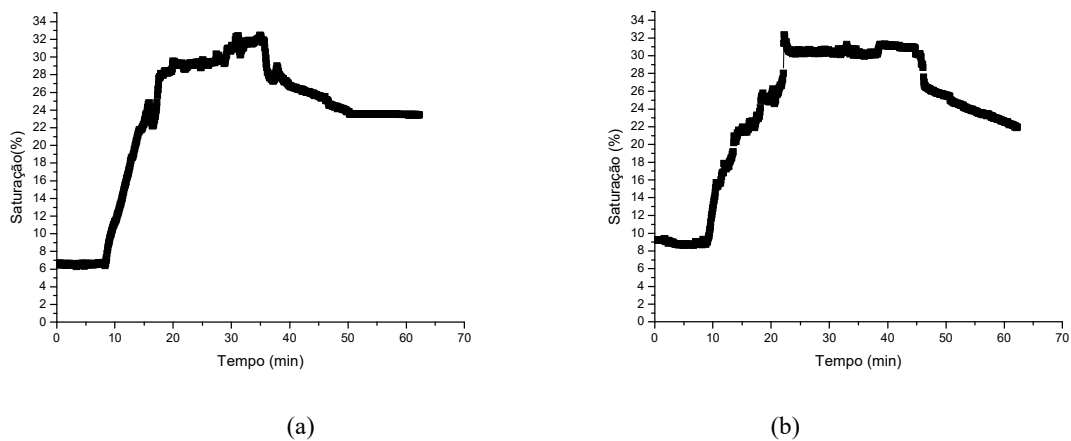


Figura 18: Evolução da umidade no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h.



Para a simulação do evento de chuva de 64,20 mm/h, observa-se na figura 18, que o tempo de pico dos dois ensaios foi para o primeiro a 23 minutos e o segundo a 37 minutos. Nos dois ensaios houve uma diferença significativa no volume de escoamento superficial, no experimento foram observados volumes de 27,11 L e 54,29 L para o primeiro e segundo ensaio respectivamente (quadro 6). Estes valores refletiram na diferença dos coeficientes de escoamento entre os dois ensaios.

No primeiro ensaio a produção do escoamento superficial ocorreu aos 15 minutos, enquanto que no segundo houve o surgimento do escoamento superficial logo após o início da precipitação. Percebe-se que umidade média inicial foi ligeiramente superior no segundo ensaio. A diferença no tempo do início do escoamento superficial pode ter relação tanto com a umidade quanto com a condição do pavimento, relacionado com o acúmulo de sedimentos no revestimento, contribuindo assim com um possível efeito da colmatação do mesmo.

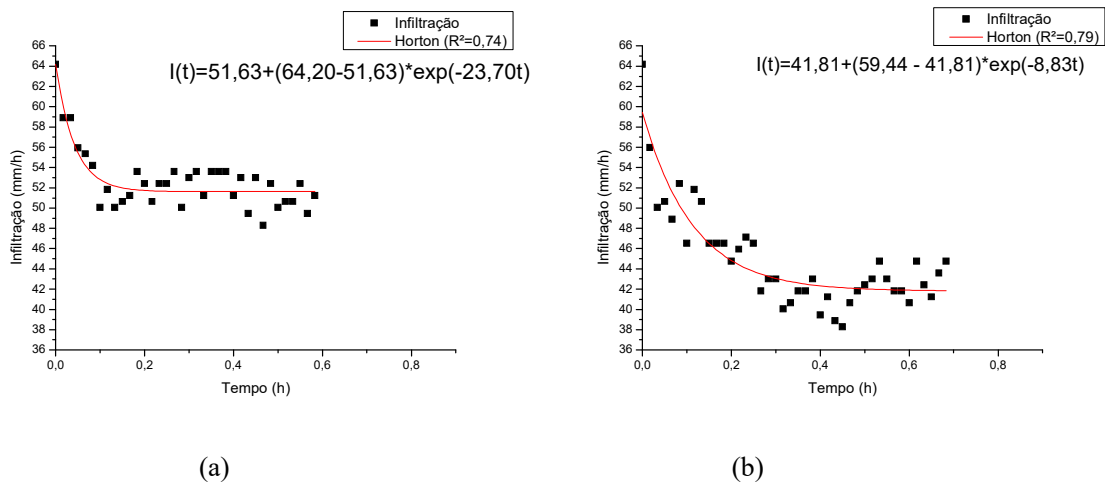
Na simulação realizada por Castro (2011), de uma chuva de menor intensidade e maior duração, não houve escoamento em sua superfície. Neste caso, a ausência de escoamento superficial pode estar relacionada com o bom estado do revestimento, as simulações de chuva foram realizadas em 2011, logo após a construção dos pavimentos. O estado do pavimento novo e a ausência da colmatação contribuíram para a infiltração da água na estrutura. Diferentemente, nesta pesquisa, houve escoamento superficial nas duas intensidades simuladas, os ensaios foram realizados dois anos após a primeira pesquisa, podendo assim afirmar que neste caso a colmatação contribuiu para que houvesse escoamento.

Apesar de realizada a limpeza antes das simulações, foi observada a presença de vegetação nos pavimentos. Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), ao analisar a eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial, afirmam que a presença de vegetação rasteira nos pavimentos permeáveis indicam a presença de matéria orgânica e sedimentos mais finos que podem causar colmatação e também podem dificultar ou impedir a infiltração da água. Isto justificaria também a redução do volume de armazenamento de 120,64 L para 102,20 L indicado no quadro 6.

Assim como no escoamento superficial, um retardo na produção do escoamento subsuperficial também foi observado. Verificou-se que o mesmo começou aproximadamente 32 minutos para o primeiro ensaio e 15 minutos para o segundo, após o início da precipitação, com um volume de escoamento de 57,65 L e 48,91 L nesta ordem.

O ajuste do modelo de Horton, ilustrado na figura 20, para ambos os ensaios apresentaram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) 0,74 e 0,79. A oscilação dos dados de infiltração pode ter contribuído para o resultado. Este resultado é ainda superior ao observado por Moura (2005) ao ajustar dados de simulação realizada sobre uma área gramada ao modelo de Horton. O autor obteve coeficientes de correlação de 0,39 e 0,57.

Figura 19: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



O baixo valor de K indica que a capacidade de infiltração do solo reduz mais lentamente.

Para o pavimento Poroso na simulação do evento de chuva de 64,20 mm/h durante 60 min não houve a formação de escoamento superficial, como pode ser observado na figura 21. No primeiro ensaio não foram observados escoamentos. A falta de escoamento no primeiro ensaio com revestimento Poroso pode estar relacionada com a quantidade de água presente na estrutura e também com a intensidade e duração de chuva simulada. Nesse caso o dispositivo mostrou-se eficiente no armazenamento temporário da água pluvial.

Figura 20: Hidrogramas do revestimento Poroso (trecho I) com simulação de 64,20 mm/h.

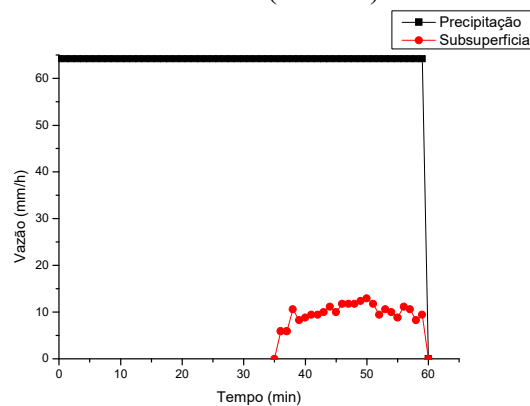
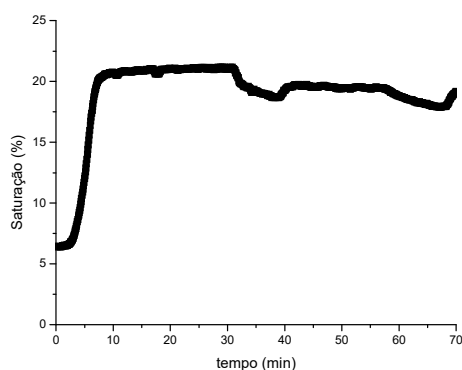


Figura 21: Evolução da umidade no pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h.



No ensaio realizado sob o pavimento Poroso o volume de escoamento subsuperficial foi de apenas 12,82 L, com duração de aproximadamente 25 minutos e sua vazão máxima de 12,96 mm/h foi alcançada aos 50 minutos após o início da precipitação, o que indica que o reservatório do pavimento retardou o escoamento de saída.

Para uma chuva de 69,00 mm/h e duração de 45 minutos, Castro (2011) obteve um volume escoado subsuperficialmente de 41,35 L. Apesar da duração da chuva utilizada pelo autor ser de duração menor, esse volume foi mais alto do que o observado nesta pesquisa, o que pode ser explicado devido à umidade média inicial, observado pelo autor, de aproximadamente 20%. Nesta pesquisa a umidade média inicial do pavimento obtida foi de 6,47%, figura 22, e sua umidade máxima foram de 21,17% que perdurou durante aproximadamente 35 minutos. Sendo-se assim, a maior umidade inicial no pavimento determina um maior volume de escoamento subsuperficial.

Para os ensaios realizados sobre o pavimento Concregrama, assim como no Poroso, também não houve escoamento superficial, os hidrogramas ilustrados na figura 23 representam o escoamento subsuperficial ao longo dos ensaios.

Figura 22: Hidrogramas do revestimento Concregrama (trecho I) com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

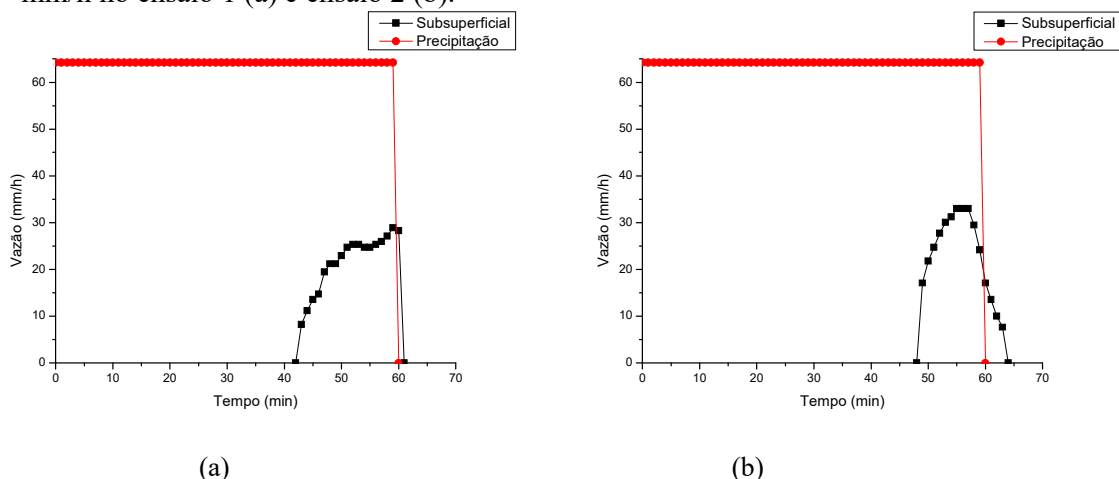
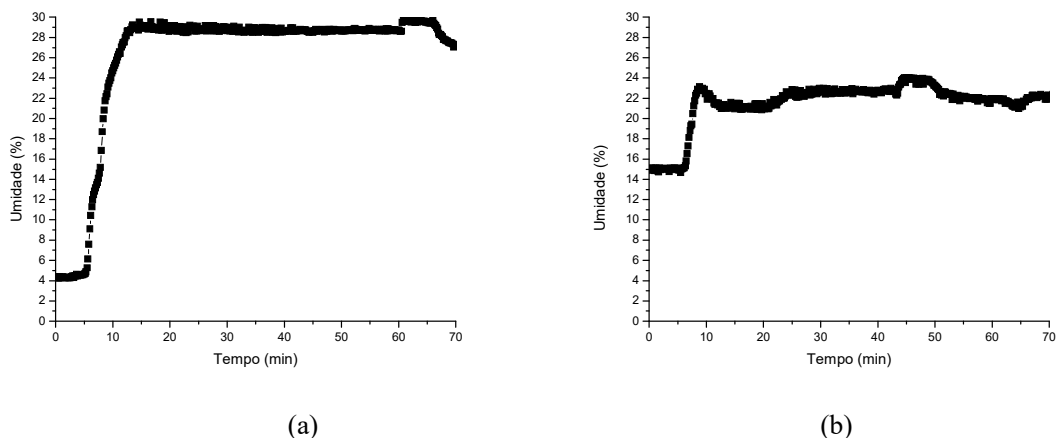


Figura 23: Evolução da umidade no pavimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Assim como representado na figura 23, os hidrogramas do escoamento subsuperficial do Concregrama foi similar em ambos os ensaios. O início da produção do escoamento foi de 42 e 48 minutos depois do início da precipitação. O retardo na produção de escoamento, de acordo com Alencar (2013) é o “tempo de entrega” da água de chuva ao sistema público de drenagem urbana. Os valores obtidos mostram a eficiência do pavimento em desafogar o sistema de drenagem convencional e minimizar o risco de inundações.

A umidade máxima nos experimentos foi de 29,51% para o primeiro ensaio e perdeu por aproximadamente 45 minutos. Já no segundo ensaio a umidade máxima foi de 23,97% e durou 60 minutos, mas como observada na figura 24, percebe-se que o

decaimento da saturação foi bem suave permanecendo na casa dos 22 % por mais de 50 minutos. Observa-se, na figura 24, que o decaimento da umidade média foi inexpressivo para os dois ensaios, portanto pode-se relacionar esse resultado com a alta capacidade de retenção da água pluvial pelo pavimento. De acordo com Castro (2011), um decréscimo mais expressivo da umidade relativa no pavimento implica em uma maior dificuldade em reter água nesta estrutura.

Comparando os três tipos de revestimento: Paver, Poroso e Concregrama, para a intensidade simulada de 64,20 mm/h, nas condições do trecho I, pode-se concluir que em relação ao volume de armazenamento o revestimento do tipo Poroso apresentou um melhor desempenho com um volume médio armazenado de 198,84 L, seguido do Concregrama com 165,63 L e por último o Paver com 111,42 L (quadro 6). Pode-se afirmar que a diferença de valores está relacionada com a permeabilidade dos revestimentos. Enquanto o Paver é permeável apenas em sua aresta, toda a extensão do pavimento do tipo Poroso permite a entrada de água para as camadas subjacentes.

Constatou-se neste trecho I que a maior parte do volume precipitado sob o revestimento infiltrou e ficou retido temporariamente. Pode-se concluir que nestas condições, tanto para a intensidade de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h, este trecho teve um bom desempenho na redução do escoamento superficial para os três tipos de revestimento, com coeficiente de escoamento C variando de 0 a 0,26.

## **- Trecho II**

O trecho II representa uma condição intermediária em relação aos demais trechos estudados, em que os revestimentos foram assentados sobre uma camada de 7 cm de areia. Esta estrutura foi construída sobre o solo compactado e recoberto por manta geotêxtil.

Os resultados do trecho II serão apresentados na mesma ordem do trecho I. Primeiro serão exibidos os resultados da simulação de chuva de 100,80 mm/h com duração de 30 minutos e logo em seguida os resultados da simulação do evento de chuva de 64,20 mm/h com duração de 60 minutos.

No quadro 7 são ilustrados os resultados das simulações para os três revestimentos com intensidade de 100,80 mm/h.

Quadro 7: Resultados das simulações no trecho II com intensidade de 100,80 mm/h e duração 30 min.

Parâmetros	Paver		Poroso		Concregrama	
	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II
Vprec (L)	161,30	161,30	161,30	161,30	161,30	161,30
Vesc (L)	17,91	10,37	s/r	s/r	s/r	s/r
Varm (L)	128,37	122,91	82,38	103,05	158,44	160,26
Vsub (L)	15,02	28,02	77,92	58,25	2,86	1,04
Qp (mm/h)	20,62	36,52	83,65*	80,11*	14,14*	5,89*
Tp (min)	10	28	18	17	27	28
C	0,11	0,06	-	-	-	-

s/r =sem registro \* Qp subsuperficial

Os hidrogramas dos escoamentos e a curva de infiltração na simulação do evento de chuva do primeiro e o segundo ensaios, com intensidade de 100,80 mm/h e duração de 30 min e a evolução da umidade do solo são apresentadas abaixo. Nestas figuras estão representados o primeiro e o segundo ensaio respectivamente.

Do mesmo modo que no experimento do trecho I, na simulação do evento de chuva de 100,80 mm/h, apenas o pavimento do tipo Paver apresentou escoamento superficial.

Figura 24: Hidrogramas e infiltração do revestimento Paver (trecho II) com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

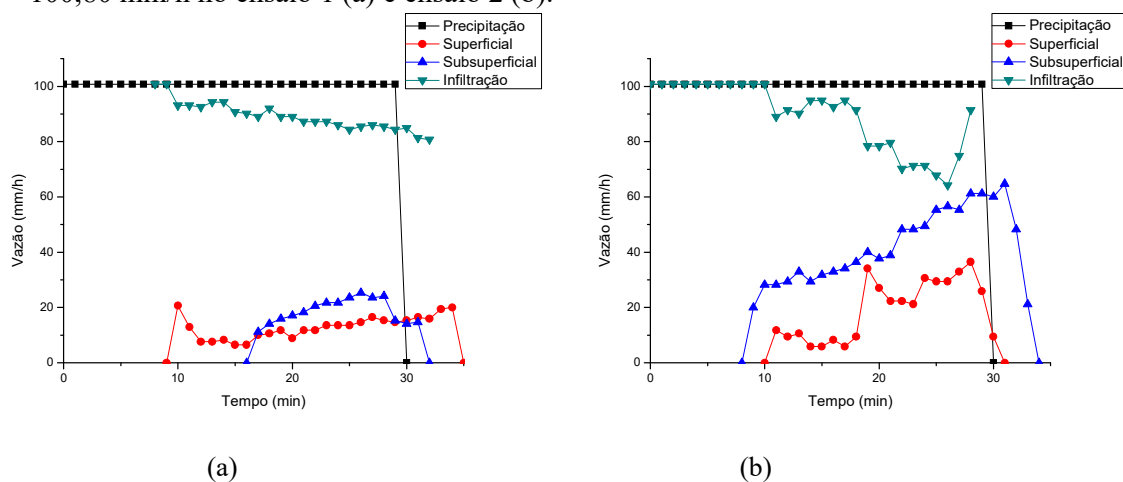
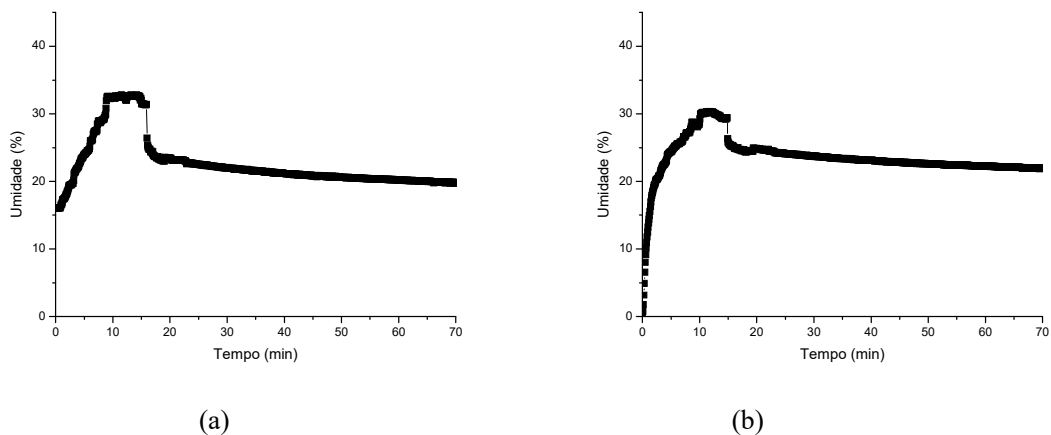


Figura 25: Evolução da umidade no pavimento Paver com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

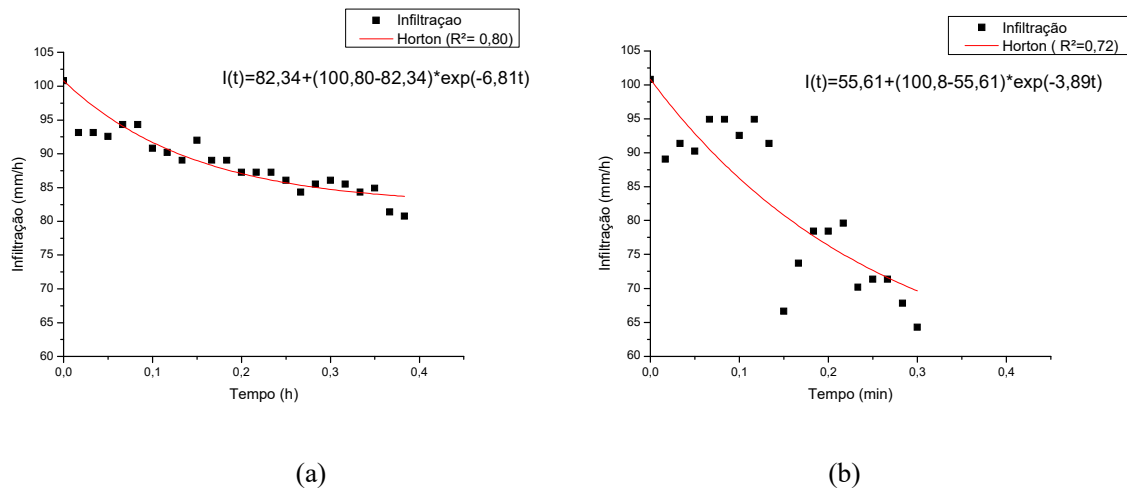


Como pode ser visualizado na figura 25, em ambos os ensaios o tempo para ocorrência do escoamento foi similar, cerca de 10 minutos após o início da chuva. Esse tempo de entrega é significativo no que diz respeito ao lançamento do escoamento na rede de drenagem pública.

O volume do escoamento superficial foi maior no primeiro ensaio, 17,91 L contra 10,37 L no segundo. Esta diferença pode estar associada com a umidade inicial do solo, figura 26, em que no primeiro evento a umidade relativa inicial foi de 16,01 % e apenas 0,21% para o segundo. Ainda que a diferença dos volumes acumulados entre os ensaios seja de apenas 6 L, pode-se relacionar, segundo Castro (2011) a maior umidade máxima com a maior capacidade de reter a água do pavimento.

O retardo na produção do escoamento foi satisfatório para os dois ensaios, o escoamento subsuperficial teve início, no primeiro ensaio, aos 22 minutos após o início da precipitação e o segundo escoamento teve o início da sua produção quase 10 minutos antes. Estes tempos são melhores que os resultado obtido anteriormente por Castro (2011), em que o escoamento subsuperficial foi mínimo e sua produção teve início em menos de 8 minutos após o início da chuva simulada.

Figura 26: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Paver com simulação de 100,8 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Como observado na figura 27, os ajustes do modelo de infiltração tiveram um resultado satisfatório em ambos os ensaios com  $R^2$  de 0,80 e 0,72 para o primeiro e segundo ensaios respectivamente. Para esta superfície, Moura (2005) obteve um coeficiente de determinação  $R^2$  análogo ao obtido no primeiro ensaio, igual a 0,83, o que mostra que, de modo geral, houve uma boa aderência aos dados observados. Observa-se que a curva do ajuste mais suave refletiu nos baixos valores de K, que demonstra a velocidade de decaimento da capacidade de infiltração.

Como já dito, nas simulações realizadas no pavimento Poroso para o trecho II, não houve escoamento superficial. Na figura 28 são ilustrados os hidrogramas do escoamento subsuperficial.

Figura 27: Hidrogramas do pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

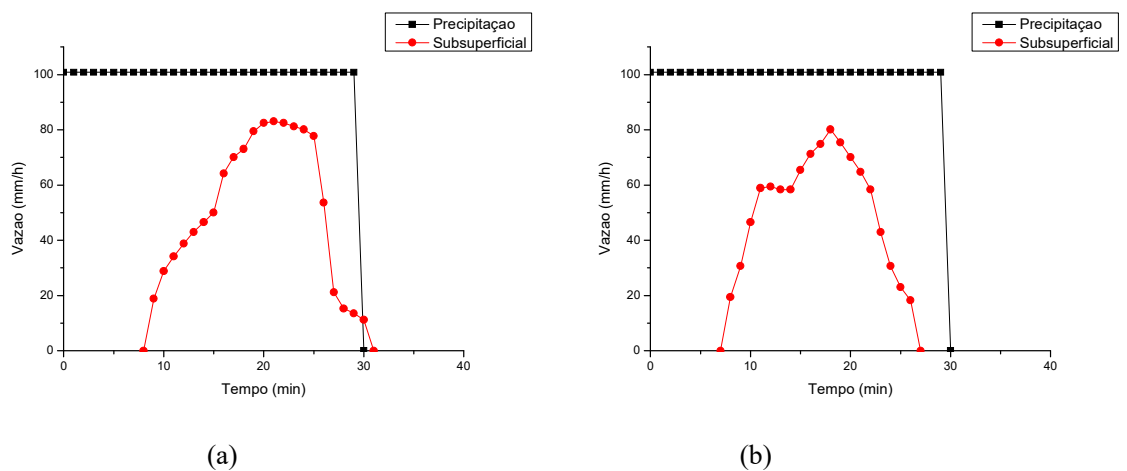
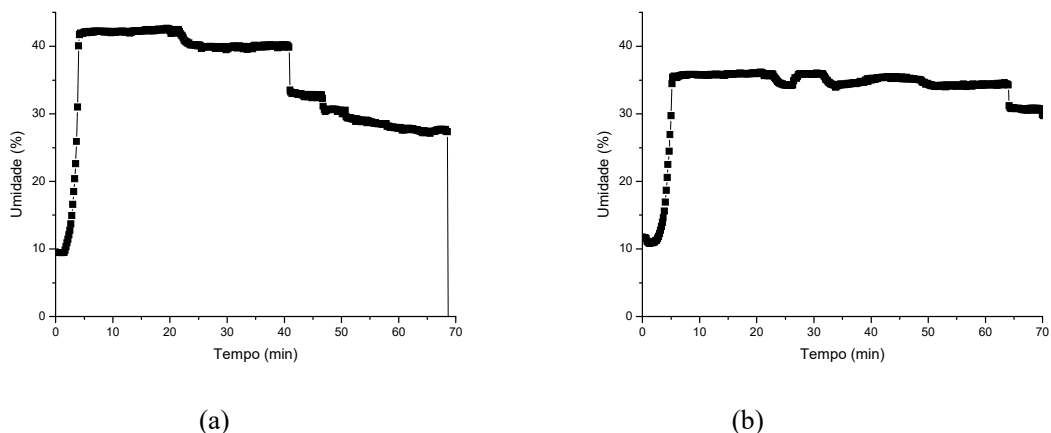


Figura 28: Evolução da umidade no pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Para os dois ensaios no pavimento poroso, o comportamento do hidrograma de resposta foi similar. Em ambos, o início do escoamento subsuperficial foi próximo, 6 minutos e a vazão de pico foi também similar de 83,65 mm/h e 80,11 mm/h para o primeiro e segundo ensaios respectivamente. diferente do obtido por Castro (2011), a vazão de pico do escoamento subsuperficial para este mesmo pavimento foi de aproximadamente 160,00 mm/h com um tempo de entrega de 10 minutos.

O comportamento dos hidrogramas encontrado pode ser explicado pelas condições semelhantes de umidade inicial do pavimento, pois o valor inicial médio foi de 9,54% para o primeiro e 11,69 % para o segundo ensaio.

Os resultados para o revestimento do tipo de Concregrama remete aos hidrogramas do escoamento subsuperficial. Resultado semelhante a este estudo foi obtido por Bruno (2011), que em uma simulação de uma chuva com intensidade de 79 mm/h sobre uma superfície de bloco de concreto vazado praticamente não obteve escoamento superficial. Assim como nesta pesquisa o escoamento superficial foi praticamente nulo, nos três ensaios realizados por Bruno (2011), apenas 1% do volume precipitado escoou superficialmente. O autor atribui esse pequeno volume escoado a retenção da água no arremate de concreto junto ao quadro metálico que delimita a área do revestimento, ou seja, a produção do escoamento foi devido a parte impermeabilizada criada pelo arremate do revestimento e da chapa metálica que delimita a área de estudo.

No trabalho desenvolvido por Moura (2005), em ensaios sobre este mesmo revestimento com chuva de intensidade de 84 mm/h também não foi observado escoamento superficial.

A resposta do revestimento frente à simulação do evento de chuva de 100,80 mm/h é ilustrada na figura 30.

Figura 29: Hidrogramas do pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

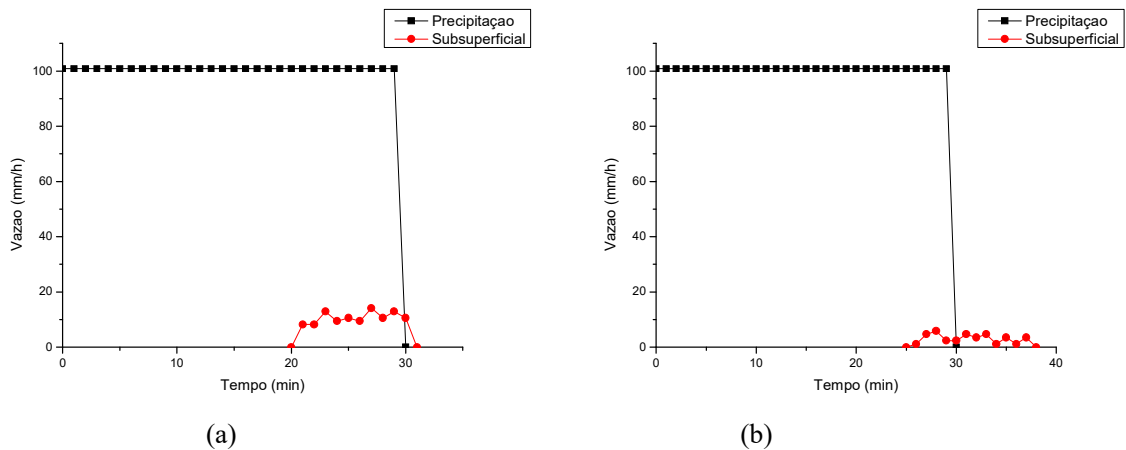
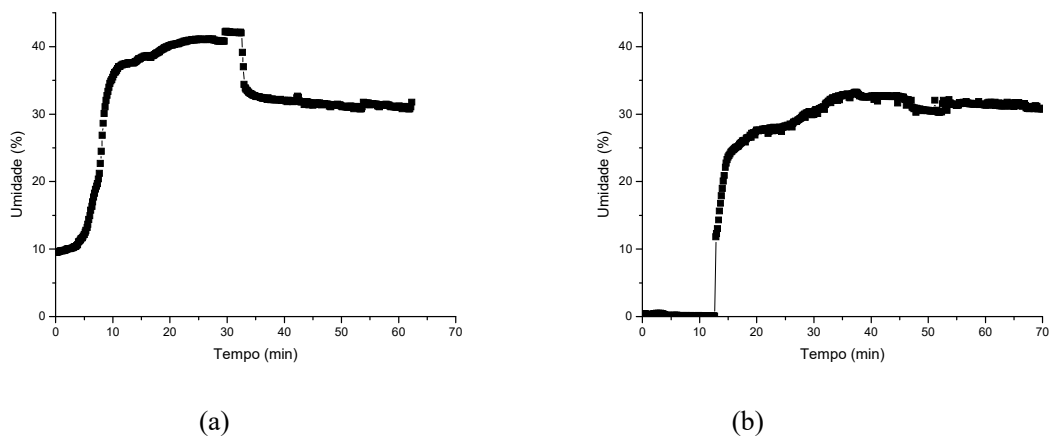


Figura 30: Evolução da umidade no pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Observa-se, na figura 30, que as vazões de escoamento subsuperficial foram baixas em ambos os ensaios. A vazão de pico no primeiro foi de 14,14 mm/h aos 27 minutos após o início da simulação da chuva e para o segundo ensaio a vazão de pico foi de 5,89 mm/h. Nota-se que o pavimento apresentou um bom resultado na atenuação do pico nos hidrogramas de saída, na retenção de água e redução dos escoamentos

superficial e subsuperficial. Resultado igualmente positivo foi obtido por Castro (2011), ao simular sobre este revestimento uma chuva de maior magnitude (180 mm/h) e mais curta duração, obtendo uma vazão máxima de 34,68 mm/h aos 13 minutos do início da precipitação.

Assim como a vazão, os volumes dos escoamentos subsuperficiais neste trabalho foram pequenos de apenas 2,89 L e 1,04 L para o primeiro e segundo ensaio, respectivamente. No trabalho de Castro (2011), entretanto, esse volume foi de 26,92 L. Acredita-se que essas diferenças sejam reflexo das condições de umidade da estrutura do pavimento, da colmatação e também na vegetação que compõem o revestimento, que desenvolvida neste caso.

A umidade, ilustrada na figura 31, reflete na quantidade de água que está presente na camada subjacente ao revestimento. Constatou-se no segundo ensaio que a umidade média inicial foi menor que 1 % (0,49%), isso favoreceu o preenchimento dos espaços vazios na estrutura e conseqüentemente a retenção da água na camada de armazenamento. Apesar da umidade inicial do solo no primeiro ensaio equivaler a aproximadamente 10 vezes mais que o verificado no segundo, os volumes armazenados são análogos, com diferença apenas de 2 L entre eles.

No quadro 8 é apresentado o resumo dos resultados dos ensaios realizados para a intensidade de 64,20 mm/h no trecho II. Observa-se que para todos os tipos de revestimento mais de 50% do volume precipitado foi armazenado, e apenas o pavimento com o revestimento Paver obteve escoamento superficial.

Quadro 8: Resultados das simulações no trecho II com intensidade de 64,20 mm/h e duração 60 min.

Parâmetros	Paver		Poroso		Concregrama	
	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II
<b>Vprec (L)</b>	205,40	205,40	205,40	205,40	205,40	205,40
<b>Vesc (L)</b>	52,68	58,84	s/r	s/r	s/r	s/r
<b>Varm (L)</b>	118,85	103,99	102,39	151,80	144,96	156,83
<b>Vsub (L)</b>	33,87	42,56	103,01	53,60	60,44	48,57
<b>Qp (mm/h)</b>	30,63	28,27	61,26*	65,38*	48,30*	42,41*
<b>Tp (min.)</b>	30	41	61	46	49	40
<b>C</b>	0,26	0,29				

s/r =sem registro \* Qp subsuperficial

Os hidrogramas dos escoamentos e a curva da de infiltração na simulação do evento de chuva nos dois ensaios, com intensidade de 64,20 mm/h e duração de 60 min, são ilustradas nas figuras 32, 35 e 37. As figuras 33, 36 e 38 ilustram a evolução da

saturação do solo. Estão representados nestas figuras o primeiro e segundo ensaios respectivamente.

As simulações no pavimento do tipo Paver resultaram nos hidrogramas representados na figura 32. Apenas este pavimento apresentou escoamento superficial.

Figura 31: Hidrogramas e infiltração do pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

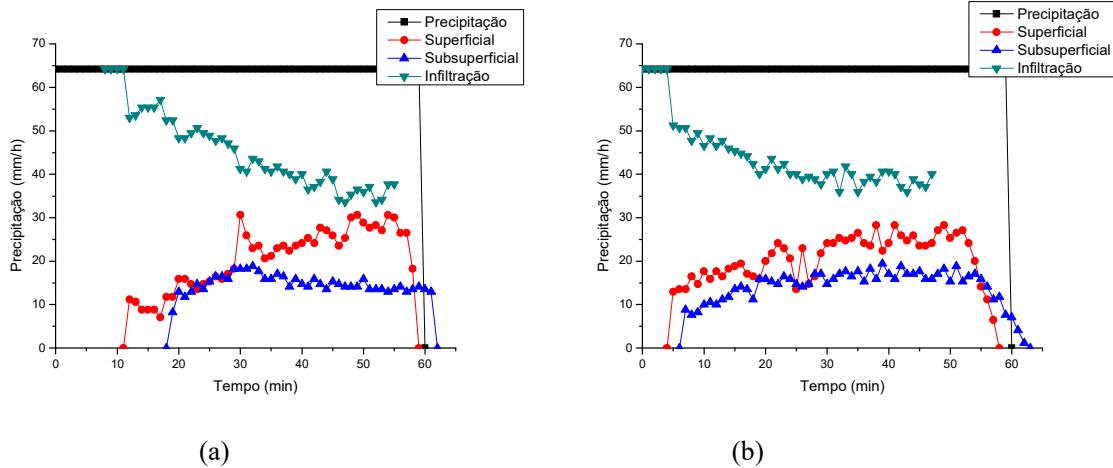
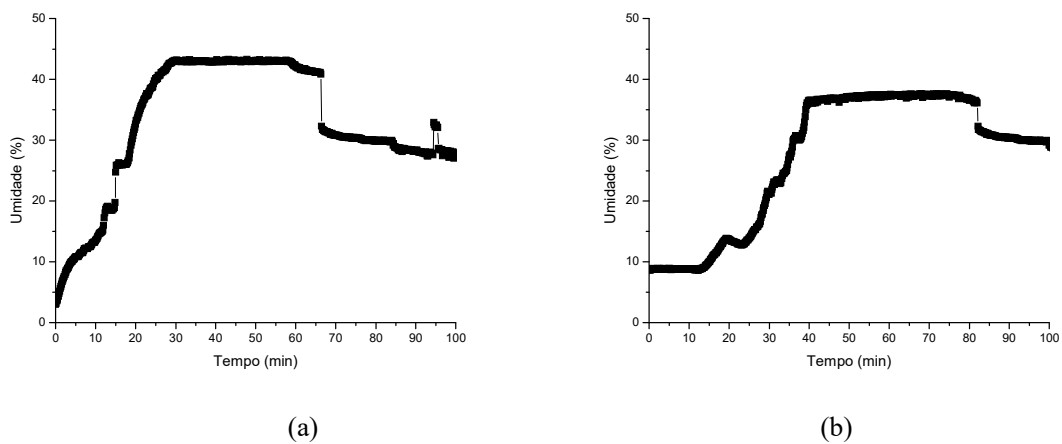


Figura 32: Evolução da umidade no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Os tempos para o início da produção do escoamento superficial ( $t$ ) para o primeiro e segundo ensaios foram de 11 e 4 minutos, nesta ordem. A diferença entre os  $t$ 's pode estar relacionada com a possível colmatção do solo das arestas deste revestimento, visto que os dois ensaios foram realizados com quase 20 dias de diferença. Esta colmatção pode ter reduzido a permeabilidade do revestimento e consequentemente antecipado a formação do escoamento. Situação semelhante foi

observada por Castro (2011), onde para a precipitação com intensidade de 69,00 mm/h e duração 45 minutos o t foi de 3,20 minutos.

A vazão máxima do escoamento superficial para o revestimento do tipo Paver foi de 30,63 mm/h para o primeiro ensaio a 30 minutos do início da precipitação, não muito diferente da vazão observada no segundo ensaio que foi de 28,27 mm/h, similar ao obtido por Castro (2011), que no seu trabalho a vazão de pico foi de 33,50 mm/h aos 33 minutos, na chuva de 69 mm/h.

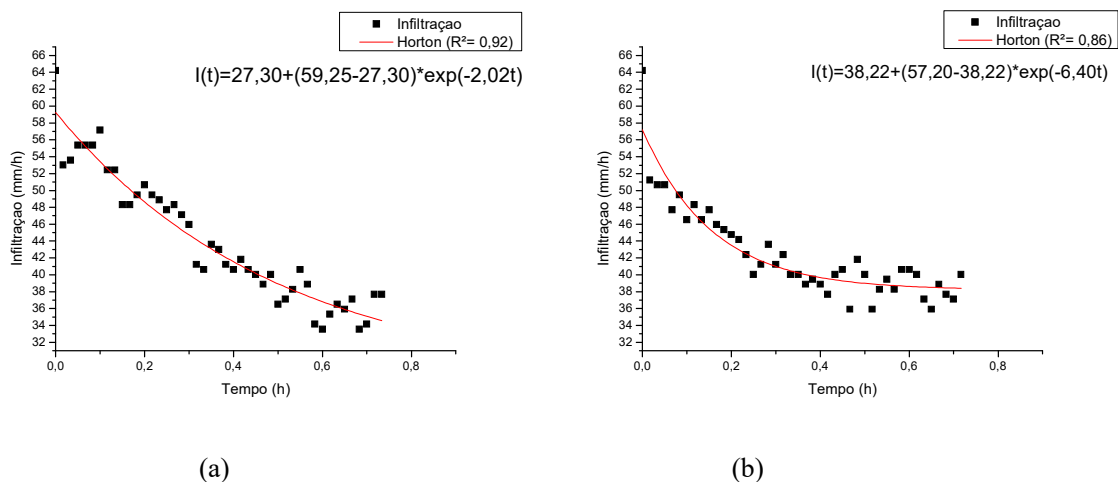
No que se refere ao escoamento subsuperficial, a sua produção teve início a 18 minutos e 6 minutos após o começo da simulação do evento de chuva, com volumes de 33,87 L e 42,56 L para o primeiro e segundo ensaios respectivamente. Sendo assim, o pavimento mostrou-se eficiente na diminuição dos volumes e em retardar escoamentos.

A umidade, ilustrada na figura 33, teve uma variação de 2,97 % a 43,32 % para o primeiro ensaio, sendo que a saturação máxima permaneceu constante durante aproximadamente 35 minutos. Já no segundo ensaio, a variação da umidade foi de 8,96 % a 37,62 % com o predomínio do pico de saturação por 40 minutos. A diferença entre os dois ensaios, em se tratando da umidade em sua estrutura, não foi significativa, o que reflete em similaridade dos resultados.

A figura 34 mostra o ajuste da equação empírica de Horton aos dados experimentais. Com o coeficiente de determinação de 0,92 e 0,86 para o primeiro e segundo ensaios, respectivamente.

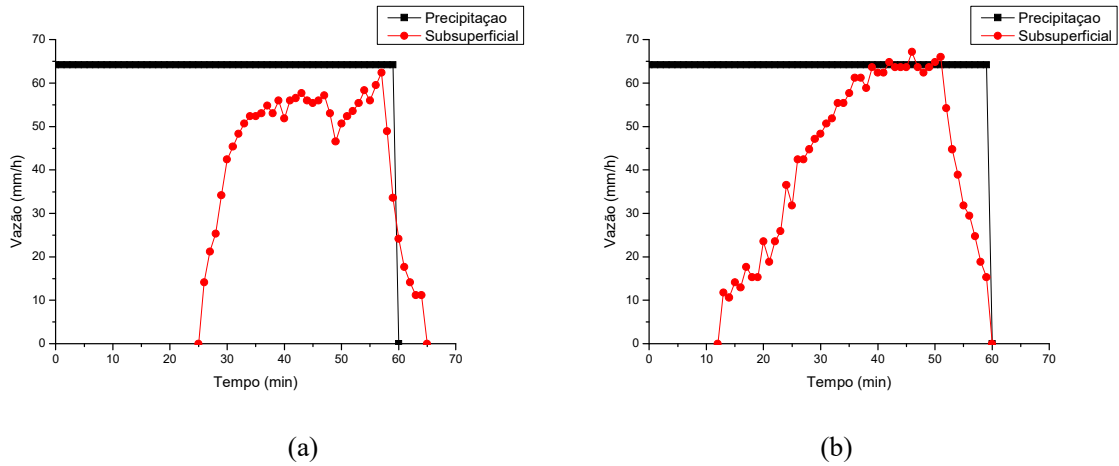
As constantes de decaimento (K) tiveram o valor reduzido nos dois casos, o que denota a condição favorável no controle da produção do escoamento com decaimento lento e gradual da taxa de infiltração.

Figura 33: Ajuste dos dados de infiltração no revestimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



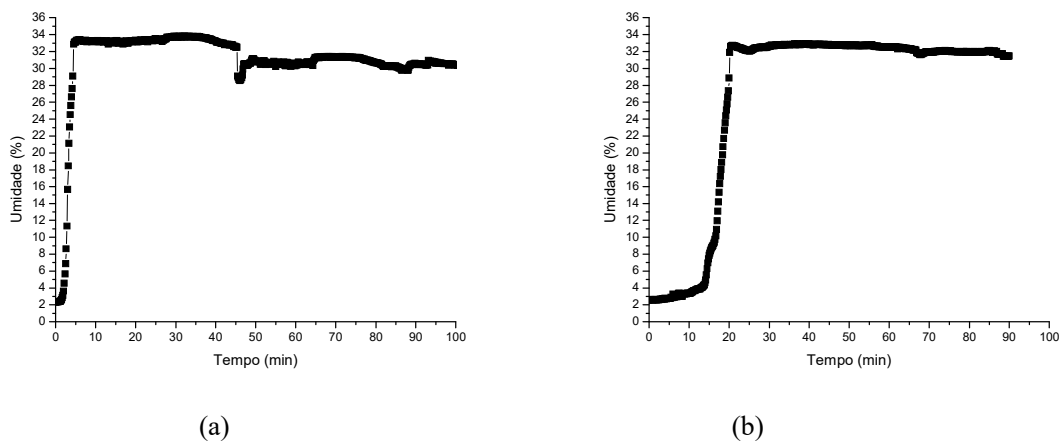
A simulação realizada no revestimento do tipo Poroso apresentou somente escoamento subsuperficial, evidenciando a boa capacidade de infiltração do pavimento. A figura 35 ilustra os hidrogramas dos dois ensaios realizados sobre este revestimento nas condições do trecho II, com precipitação de 64,20 mm/h durante 60 minutos.

Figura 34: Hidrogramas do revestimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



O comportamento do escoamento subsuperficial foi semelhante em ambos os ensaios. No primeiro caso, a vazão de pico atingiu seu máximo com valor de 61,26 mm/h. Já no segundo ensaio, a vazão máxima foi superior à vazão precipitada que foi de 65,38 mm/h aos 46 minutos após o início da chuva. Esse valor pode estar relacionado com a alta condutividade hidráulica do pavimento associada a água presente nos interstícios da estrutura do pavimento antecedente ao início dos ensaios.

Figura 35: Evolução da umidade no pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



A evolução da umidade para os dois ensaios, representada na figura 36, é parecida onde a média inicial que varia de 2,32 % a 2,54% e a umidade máxima é de 32,90 % no primeiro ensaio e de 33,84% no segundo, entretanto o tempo para a elevação da umidade foi maior no segundo ensaio. Embora o comportamento da frente de umidade ter sido similar nos dois ensaios, a diferença do volume de água acumulado foi quase 50 L maior para o segundo, como apresentado no quadro 8 (pág. 62). E com o volume de escoamento subsuperficial obtido 103,01 L, sendo maior que o registrado no segundo caso (53,60 L).

O início da produção do escoamento subsuperficial foi aproximadamente de 12 a 25 minutos após o início da precipitação o que indica um bom desempenho do pavimento. Esse tempo ocorre em virtude da necessidade de saturação das camadas até a formação do escoamento. Desta forma, a água demora a chegar ao sistema público de drenagem, contribuindo para atenuar os efeitos das enchentes urbanas.

Estes resultados corroboram com os dados de Castro (2011), a formação do escoamento ocorreu em média aos 12 minutos após o início da chuva, e este retardo é para uma melhor gestão das águas pluviais urbanas.

As simulações de chuva de 64,20 mm/h sob o revestimento do tipo Concregrama no trecho II resultaram apenas na produção de escoamento subsuperficial. A figura 37 apresenta os hidrogramas do escoamento subsuperficial obtidos no primeiro e segundo ensaios, respectivamente. A figura 38 mostra a evolução da umidade da camada de armazenamento durante os experimentos.

Figura 36: Hidrogramas do revestimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

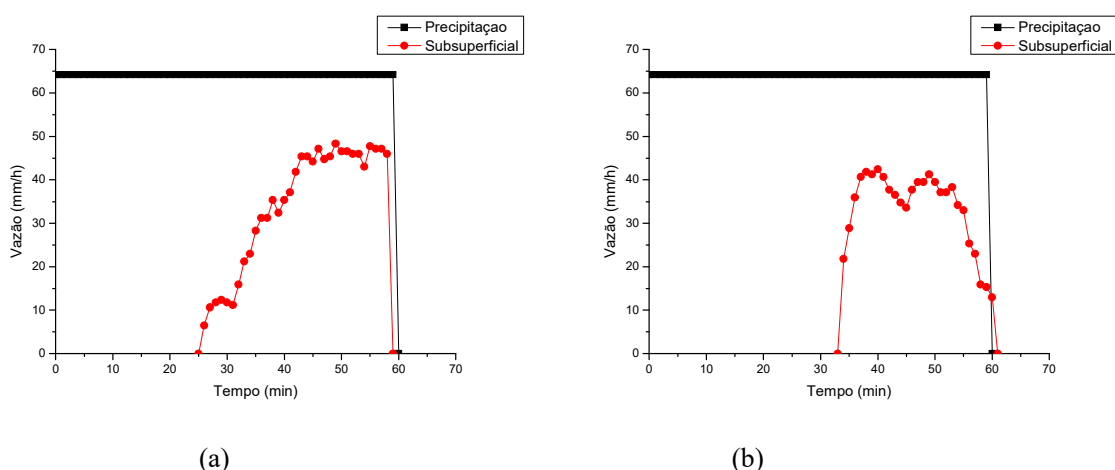
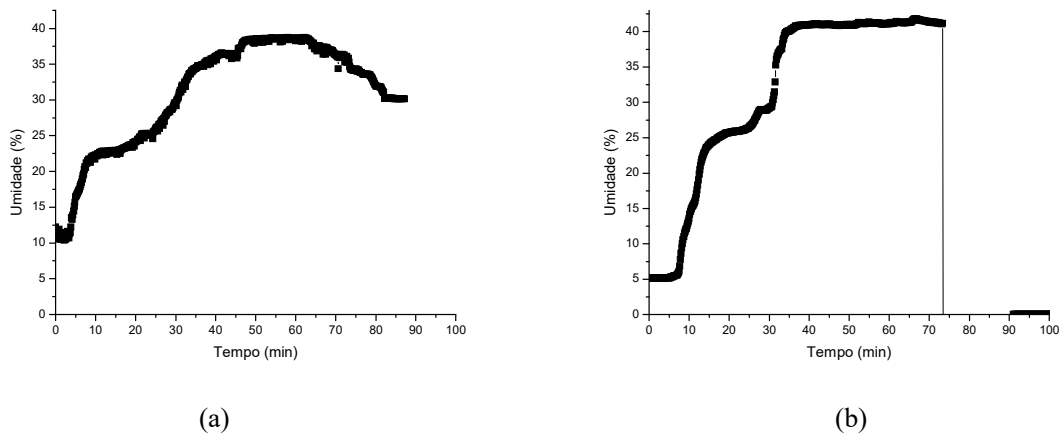


Figura 37: Evolução da umidade no pavimento com Concregrama com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Para os dois ensaios o comportamento da vazão de escoamento subsuperficial foi próxima. Na figura 37, o primeiro caso o pico foi atingido aos 49 minutos após o início do escoamento com valor de 48,30 mm/h, já o segundo a vazão de pico chegou a 42,41 mm/h.

Considerando o tempo para a geração do escoamento, no primeiro ensaio o mesmo iniciou aos 25 minutos após o início da precipitação simulada e o segundo aos 35 minutos. Desta forma, o pavimento mostrou-se eficaz no que diz respeito ao retardo na formação do escoamento e no encaminhamento desse escoamento para a rede de drenagem.

Na figura 38 (b), observa-se que a umidade alcançou um patamar de 41%, isto demonstra uma maior retenção de água no pavimento e conseqüentemente um maior volume armazenado (156,83 L) em relação ao primeiro ensaio (144,96 L).

Estima-se que cerca de 76% do volume precipitado ficou retido temporariamente. Teoricamente a capacidade máxima de água possível de ser retida na camada de areia de 7 cm é de 105,28 L, com base na porosidade do material (areia e da brita 1 é 0,49 e 0,47). Desta forma, acredita-se que uma parcela de água seja retida na estrutura do revestimento, em armazenamento em depressões, ou interceptada pela grama.

Pode-se afirmar que dentre os três revestimentos, o Concregrama foi o que apresentou melhor desempenho hidrológico. O seu volume de armazenamento foi maior que os demais pavimentos e o pico da vazão do escoamento subsuperficial foi menor

(quadro 8). Mesmo o Paver que produziu escoamento superficial teve um bom desempenho em relação a uma superfície impermeável, pois reteu quase 55 % do volume precipitado.

### - Trecho III

O trecho III apresenta apenas uma camada de 4 cm de areia sobre o solo natural. Neste trecho foram contabilizados apenas os escoamentos superficiais visto que o mesmo não apresenta dreno para a quantificação do escoamento subsuperficial.

Os resultados deste trecho serão apresentados na mesma ordem dos demais. Primeiro serão exibidos os resultados da simulação de chuva de 100,80 mm/h com duração de 30 minutos e logo em seguida os resultados da simulação do evento de chuva de 64,20 mm/h que teve duração de 60 minutos.

Uma síntese dos resultados das simulações para os três pavimentos com intensidade de 100,80 mm/h é ilustrada no quadro 9.

Quadro 9: Resultados das simulações no trecho III com intensidade de 100,80 mm/h e duração 30 min.

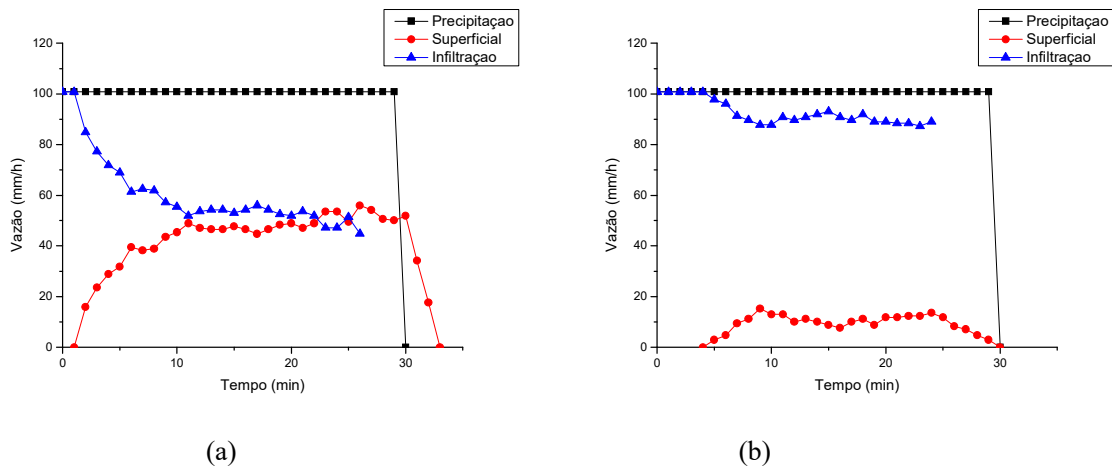
Parâmetros	Paver		Poroso		Concregrama	
	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II
<b>Vprec (L)</b>	161,30	161,30	161,30	161,30	161,30	161,30
<b>Vesc (L)</b>	71,72	13,01	55,35	37,73	6,38	s/r
<b>Varm (L)</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Vsub (L)</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Qp (mm/h)</b>	55,96	15,31	70,69	32,74	10,60	s/r
<b>Tp (min.)</b>	26	8	25	27	39	s/r
<b>C</b>	0,45	0,08	0,34	0,23	0,04	s/r

s/r =sem registro

Observa-se pelo quadro 9 que este trecho foi o único que apresentou escoamento superficial para todos os revestimentos. Castro (2011) em sua pesquisa realizou ensaios de compressão sobre esse trecho, o que justifica uma dificuldade de infiltração e uma compactação da sub-base (solo).

A figura 39 ilustra os hidrogramas dos dois ensaios realizados sobre o pavimento Paver nas condições do trecho III, com precipitação de 100,80 mm/h durante 30 minutos.

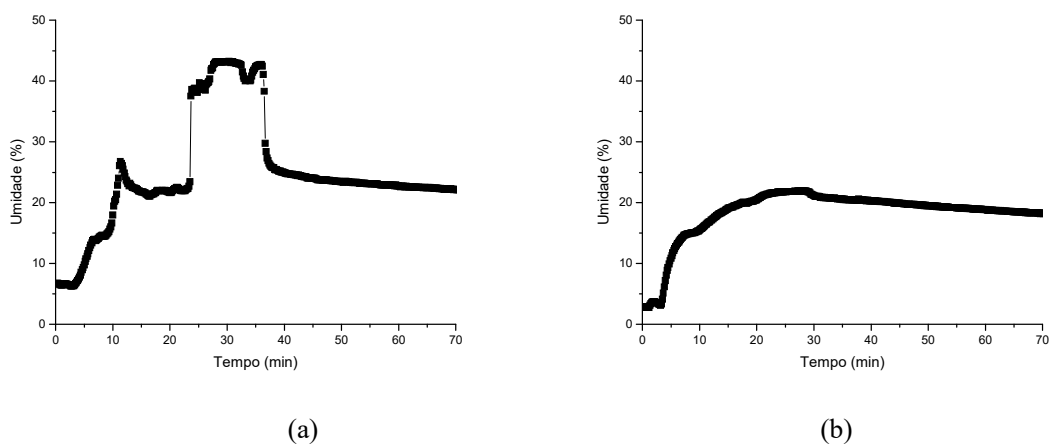
Figura 38: Hidrogramas e infiltração do revestimento Paver com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



O comportamento dos hidrogramas de resposta para o evento de chuva simulado sobre o pavimento foi distinto. No primeiro caso, a vazão atingiu seu máximo aos 26 minutos após o início da chuva e com valor de 55,96 mm/h. Já no segundo, a vazão alcançou seu pico no início do escoamento, aos 8 minutos, e foi de apenas 15,31 mm/h.

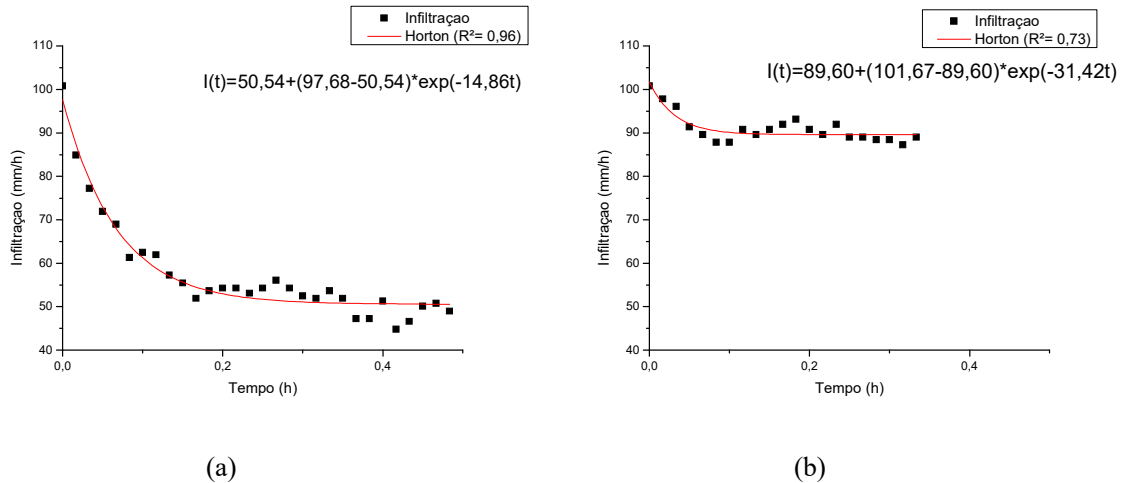
Este resultado diferenciado pode estar relacionado com a evolução da umidade na camada de armazenamento ao longo do experimento. No primeiro ensaio a curva de umidade apresentou dois picos, como pode ser observada na figura 40. A sua variação foi de 6,64 % a 42,74 %, e a umidade máxima foi quase o dobro do valor máximo no segundo ensaio (21,89 %). O tempo para atingir o pico foi menor que no segundo. Acredita-se no primeiro ensaio as condições do solo com maior umidade contribuíram para o maior volume de escoamento superficial.

Figura 39: Evolução da umidade no revestimento Paver com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Sendo assim, pode-se afirmar também que o decaimento menos expressivo da saturação no segundo ensaio contribuiu para a maior infiltração de água, pois neste caso as condições da base são favoráveis ao seu armazenamento.

Figura 40: Ajuste dos dados de infiltração no revestimento Paver com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Observa-se que o primeiro ensaio houve um melhor ajuste do modelo do que no segundo, devido ao menor espalhamento dos pontos ao longo da curva. A diferença entre os ensaios justifica-se que, no primeiro caso, como já dito, os ensaios foram realizados em um período chuvoso.

Os hidrogramas do primeiro e segundo ensaios realizados no pavimento do tipo Poroso são ilustrados na figura 42. Na figura 43 ilustra-se a evolução da saturação do solo nos experimentos.

Figura 41: Hidrogramas do pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).

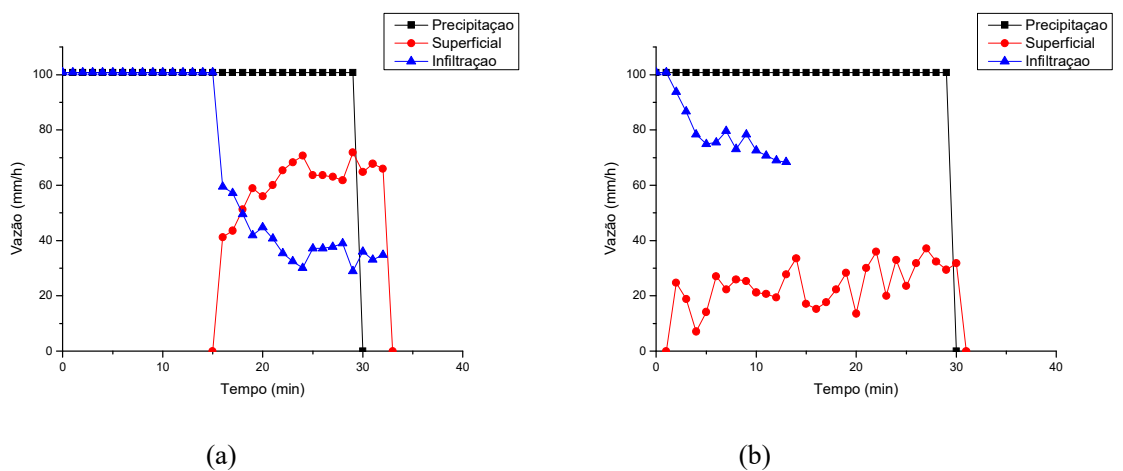
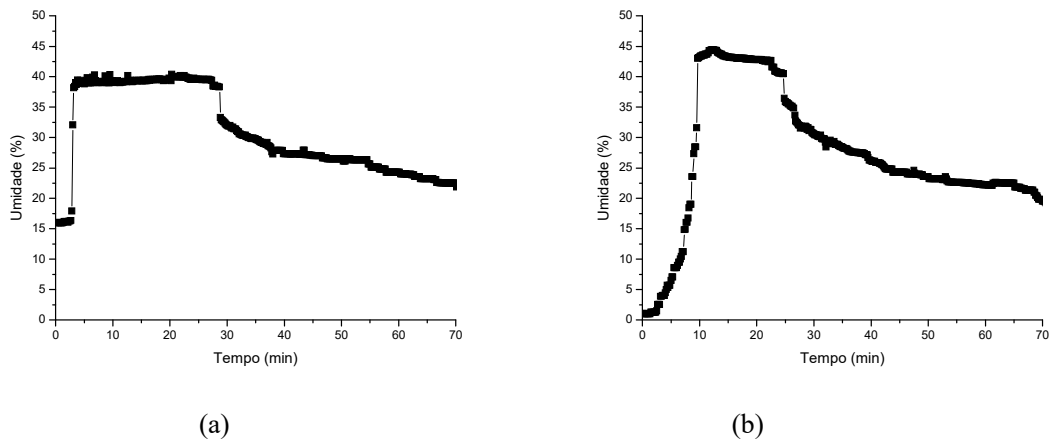


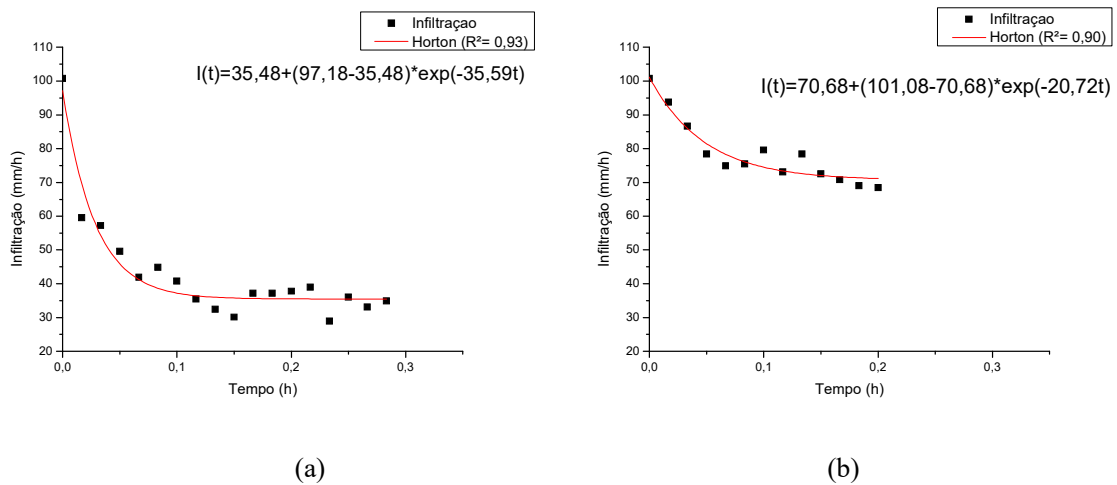
Figura 42: Evolução da umidade no pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e no ensaio 2 (b).



A vazão de pico nestes ensaios atingiram os valores mais altos para simulações realizadas neste tipo de pavimento, especialmente no primeiro ensaio com 70,69 mm/h. Devido a pequena camada de base (4 cm) a saturação foi rápida e intensa dificultando a entrada da água pela superfície.

Apesar da umidade da estrutura no primeiro ensaio ser quase 15 vezes maior do que no segundo, a produção do escoamento só ocorreu 15 minutos após o início da simulação de chuva. O volume escoado neste ensaio foi maior, 55,35 L.

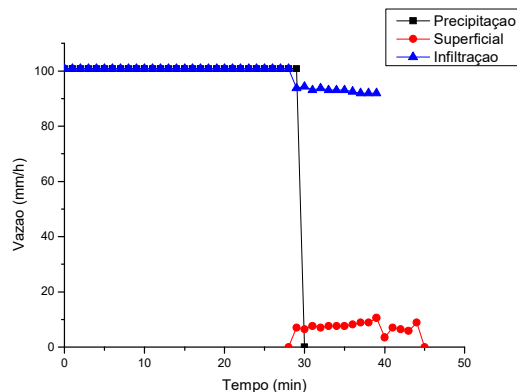
Figura 43: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Poroso com simulação de 100,80 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



Os dados experimentais do pavimento Poroso apresentaram um bom ajuste da equação de Horton em ambos os ensaios, com o coeficiente  $R^2$  foi maior que 0,80 (figura 44).

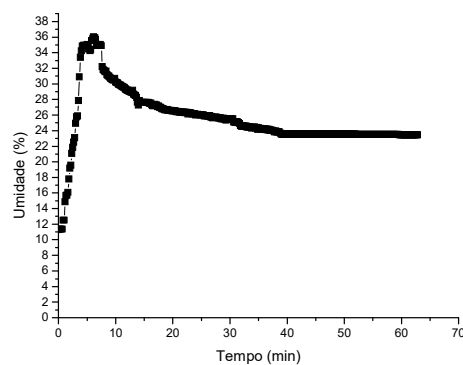
Nos experimentos realizados no Concregrama, apenas no primeiro ensaio houve escoamento superficial, por essa razão o segundo ensaio não é ilustrado na figura 45.

Figura 44: Hidrograma do pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h.



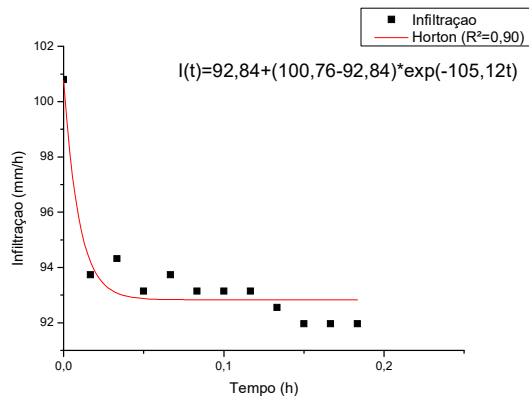
Os valores de vazão e volume, encontrados na simulação neste pavimento foram menores que os resultados apresentados nos outros pavimentos. Isso porque, foi observado durante a realização do experimento, o armazenamento em depressões e a interceptação da grama presente no preenchimento deste pavimento contribuíram com o acúmulo de água sobre o revestimento. Com isso, a produção do escoamento superficial só ocorreu quase no final da simulação do evento de chuva e a vazão de pico foi de apenas 10,60 mm/h com volume escoado de 6,38 L (quadro 9). Situação semelhante foi verificada no trabalho desenvolvido por Silva (2006), em que houve o atraso na formação do escoamento superficial. O autor atribuiu este atraso à presença de espaços entre a areia de preenchimento, os blocos vazados e a superfície do revestimento.

Figura 45: Evolução da umidade no pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h.



Ilustrada na figura 46, a evolução da umidade na estrutura do pavimento apresentou uma variação de 12,29 % a 36,05 %, sendo que a umidade máxima ficou estável somente 5 minutos.

Figura 46: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Concregrama com simulação de 100,80 mm/h.



Constata-se pela figura 47 que houve pouco decréscimo da taxa de infiltração durante o ensaio. Pode-se deduzir que este resultado foi influenciado pelo conjunto grama/areia, o que favoreceu a aparente infiltração.

Com relação ao coeficiente K do modelo de infiltração de Horton, observou-se um maior valor para o revestimento Concregrama, resultado também encontrado por Castro (2011). Isso mostra que há um rápido decréscimo nas taxas de infiltração. Entretanto isso não compromete o bom desempenho do pavimento, visto que houve uma redução do volume escoado.

Comparando os três revestimentos no trecho III e intensidade de 100,80 mm/h, pode-se afirmar que o pavimento do tipo Concregrama apresentou o melhor desempenho, com menor coeficiente de escoamento 0,04 e na redução da vazão e do volume escoado.

Na simulação dos eventos de chuva com intensidade de 64,20 mm/h e duração de 60 minutos, os hidrogramas dos escoamentos e a curva da de infiltração na simulação do evento de chuva sobre os três tipos de revestimento são ilustradas nas figuras 48, 51 e 54. As figuras 49, 52 e 55 ilustram a evolução da saturação do solo. São representados nestas figuras o primeiro e segundo ensaios respectivamente. O quadro 10 apresenta o resumo dos principais resultados dos ensaios realizados no trecho III.

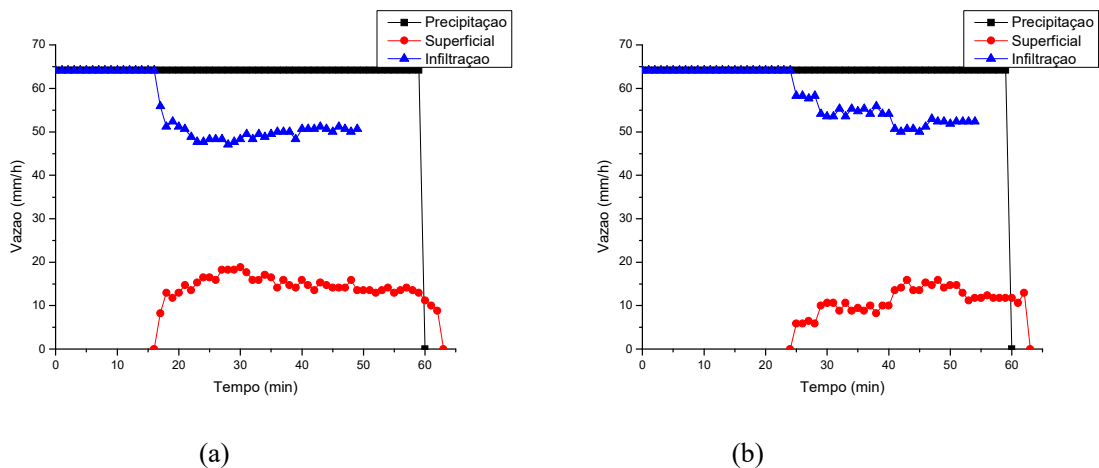
Quadro 10: Resultados das simulações no trecho III com intensidade de 64,20 mm/h e duração 60 min.

Parâmetros	Paver		Poroso		Concregrama	
	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II	Simulação I	Simulação II
Vprec (L)	205,40	205,40	205,40	205,40	205,40	205,40
Vesc (L)	35,47	23,00	52,24	68,42	s/r	0,31
Varm (L)	-	-	-	-	-	-
Vsub (L)	-	-	-	-	-	-
Qp (mm/h)	18,85	15,90	32,99	40,64	s/r	3,48
Tp (min.)	30	43	33	55	s/r	56
C	0,17	0,11	0,25	0,33	s/r	$1,51 \cdot 10^{-3}$

s/r =sem registro

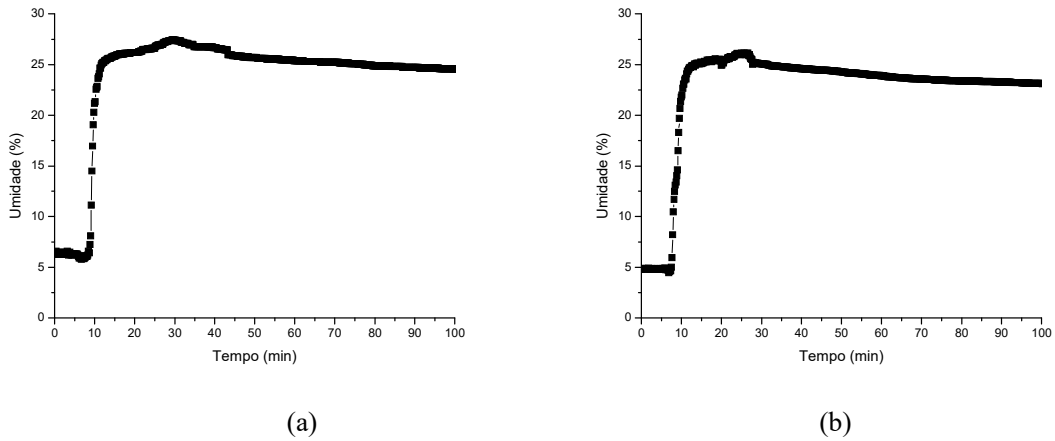
Os hidrogramas dos ensaios realizados no pavimento do tipo Paver são ilustrados na figura 48.

Figura 47: Hidrogramas do pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



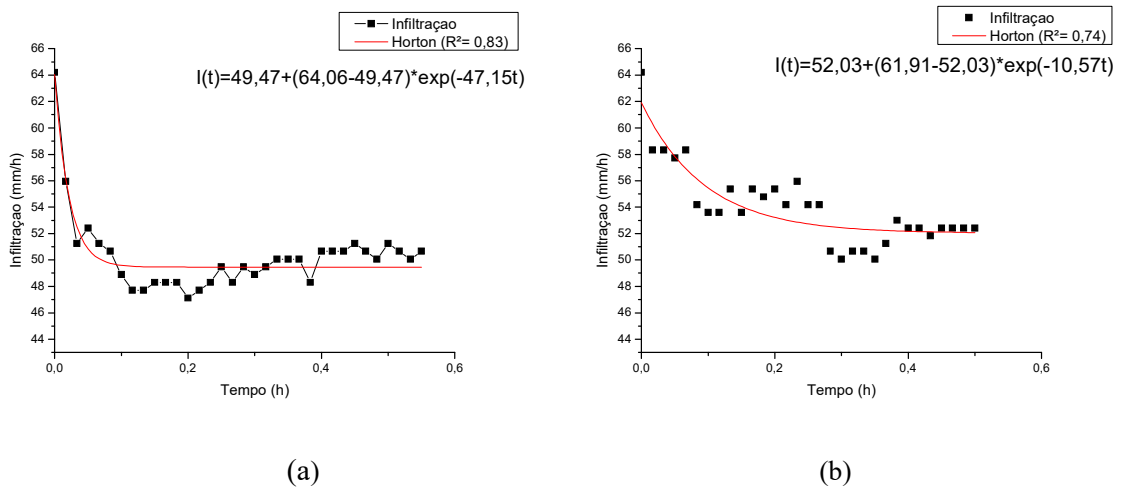
O comportamento dos hidrogramas foi similar em ambos os ensaios, diferenciando significativamente apenas no início da formação do escoamento. A produção do escoamento foi de 16 e 24 minutos para o primeiro e segundo ensaios, após o início do evento de chuva, resultado esse positivo em vistas do retardo do escoamento. Esse comportamento similar também se estende para a curva da evolução da umidade no tempo, ilustrada na figura 49. A umidade inicial foi de 6,49 % e 4,79 % para os dois ensaios. A umidade máxima para ambos foi de 26,11 % e 27,41 %.

Figura 48: Evolução da umidade no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



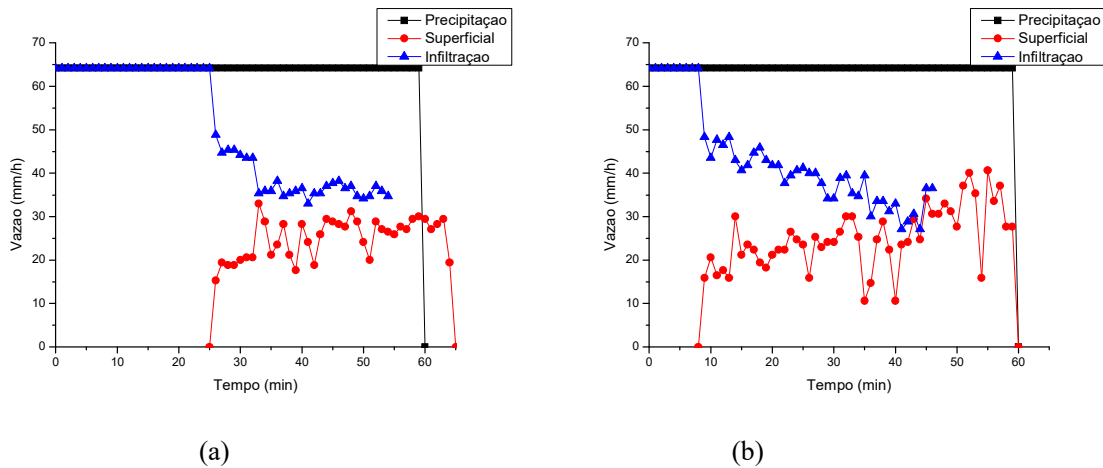
Com relação ao ajuste da equação do modelo Horton, para ambos os ensaios obteve-se um ajuste razoável com  $R^2$  entre 0,74 e 0,83. No ajuste dos dados experimentais houve um pequeno decréscimo da capacidade de infiltração durante o ensaio.

Figura 49: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Paver com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



A simulação do evento de chuva sobre o pavimento Poroso resultou nos hidrogramas representados na figura 51.

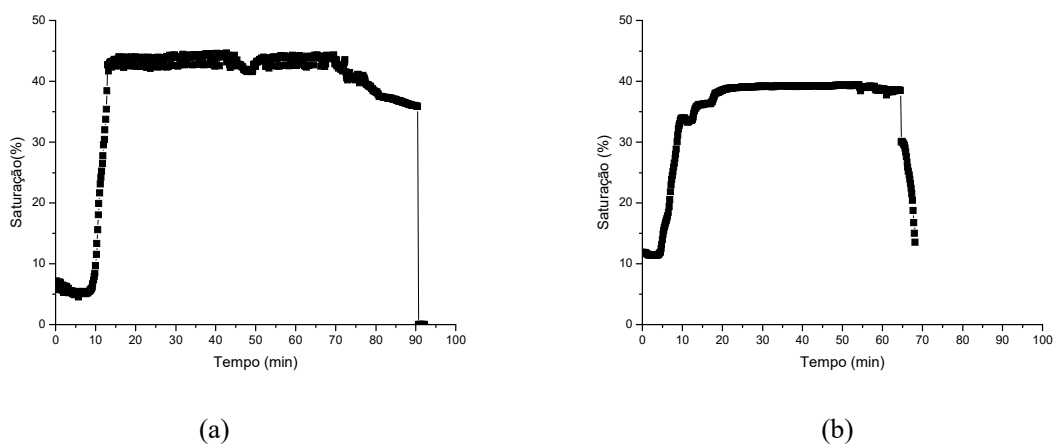
Figura 50: Hidrogramas do pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



No primeiro ensaio, a produção do escoamento superficial aconteceu a 25 minutos do início da precipitação e seu pico, 32,99 mm/h, foi alcançado 8 minutos depois. No segundo evento o início do escoamento foi mais rápido que o primeiro aos 8 minutos em contrapartida a sua vazão máxima de 40,64 só ocorreu 47 minutos depois. Em ambos os casos houve um retardo na formação do escoamento superficial, no segundo ensaio, a pequena camada onde está assentado o revestimento e a sua umidade contribuíram para a redução desse tempo.

O volume de escoamento foi de 52,24 L e 68,42 L para o primeiro e segundo ensaios, respectivamente. Apesar da diferença entre os volumes escoados ser pequena, pode-se relacionar o maior volume no segundo caso com a umidade média inicial, figura 52, que foi de 11,94 % e no primeiro 6,61 %. Ou seja, a maior umidade da estrutura implica em um maior volume de escoamento superficial.

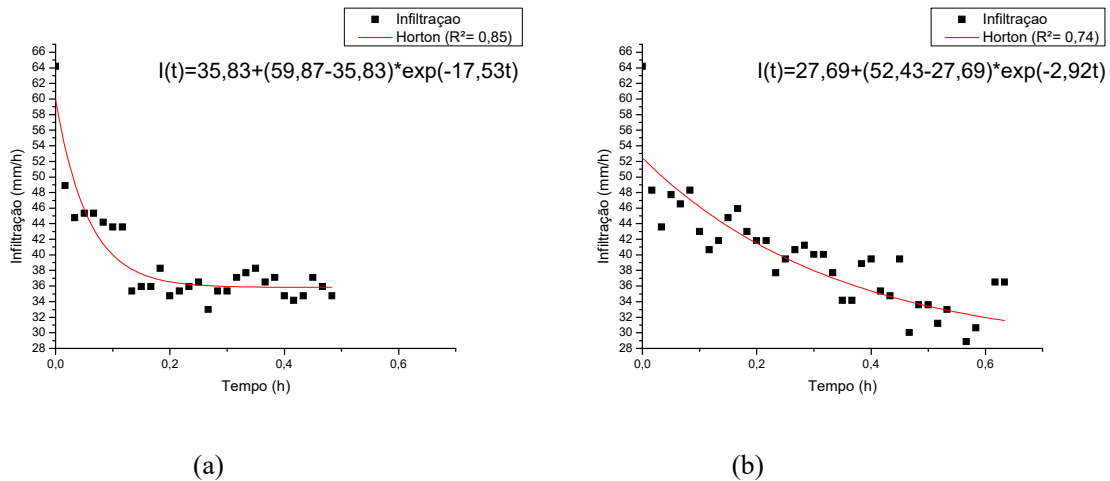
Figura 51: Evolução da saturação do solo no pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio 1 (a) e ensaio 2 (b).



A umidade máxima da estrutura nos ensaio chegou a 44,30 % para o primeiro ensaio e 39,44 % no segundo. Sendo que no primeiro este valor consolidou-se por mais de 60 minutos e no segundo 45 minutos.

O ajuste da equação de infiltração de Horton aos dados experimentais foi razoável. As oscilações nos dados experimentais, do segundo ensaio causou um menor coeficiente  $R^2 = 0,74$ , em relação ao primeiro  $R^2 = 0,85$ .

Figura 52: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Poroso com simulação de 64,20 mm/h no ensaio1 (a) e ensaio 2 (b).



No pavimento Concregrama, como ilustrado na figura 54, apenas o segundo ensaio gerou escoamento superficial e ainda assim o volume escoado foi de apenas 0,31 L. O armazenamento em depressões e a interceptação observada ao longo da realização do experimento são responsáveis por este resultado. Pode-se afirmar também que a não produção de escoamento no primeiro ensaio está relacionada com o efeito da interceptação da grama e o acúmulo de água na superfície do pavimento.

A formação do escoamento ocorreu quase no final da simulação da chuva, 56 minutos, e a vazão de pico atingida 3 minutos depois foi de apenas 3,48 mm/h.

Quanto à saturação do solo, ilustrada na figura 55, houve uma variação de 7 % a 35,26 %. O pico da saturação perdurou por mais de 65 minutos.

Figura 53: Hidrograma do pavimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h.

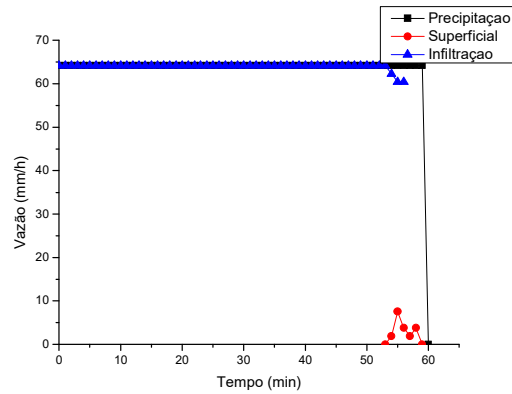


Figura 54: Evolução da umidade no pavimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h.

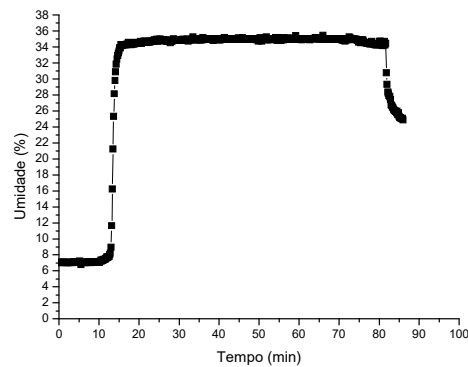
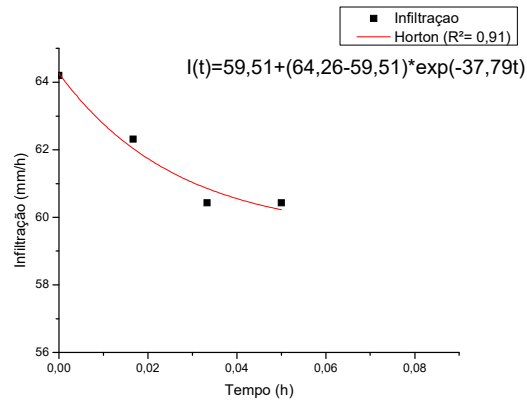


Figura 55: Ajuste dos dados de infiltração no pavimento Concregrama com simulação de 64,20 mm/h.



Apesar da quantidade reduzida de pontos experimentais disponíveis, coeficiente de determinação foi de  $R^2 = 0,91$ .

Pode-se afirmar que o Concregrama apresentou o melhor desempenho em termos de redução de escoamento superficial, em relação aos demais pavimentos na

simulação sobre o trecho III. Este pavimento apresentou um escoamento superficial reduzido e também o menor coeficiente de escoamento.

### 5.1 Análise do desempenho hidrológico

A análise do desempenho hidrológico dos pavimentos foi realizada a fim de avaliar a resposta de cada revestimento e sua respectiva estrutura (trechos I, II e III) em relação ao volume escoado total ( $V_{tesc}$ ), coeficiente de escoamento ( $C$ ) e volume armazenado ( $V_{arm}$ ), todos em relação ao volume precipitado e  $T_e$ , para as duas intensidades de chuva simulada.

As figuras 57 e 58 ilustram o desempenho dos pavimentos em relação aos escoamentos. A figura 57 demonstra a relação do volume total escoado ( $V_{tesc}$ ) e o volume precipitado para cada intensidade de chuva. O  $V_{tesc}$  é a soma dos escoamentos superficial e subsuperficial. Na figura 58 a relação apresentada é a do coeficiente de escoamento ( $C$ ).

Figura 56: Relação do volume total escoado ( $V_{tesc}$ ) e o volume precipitado na simulação de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h.

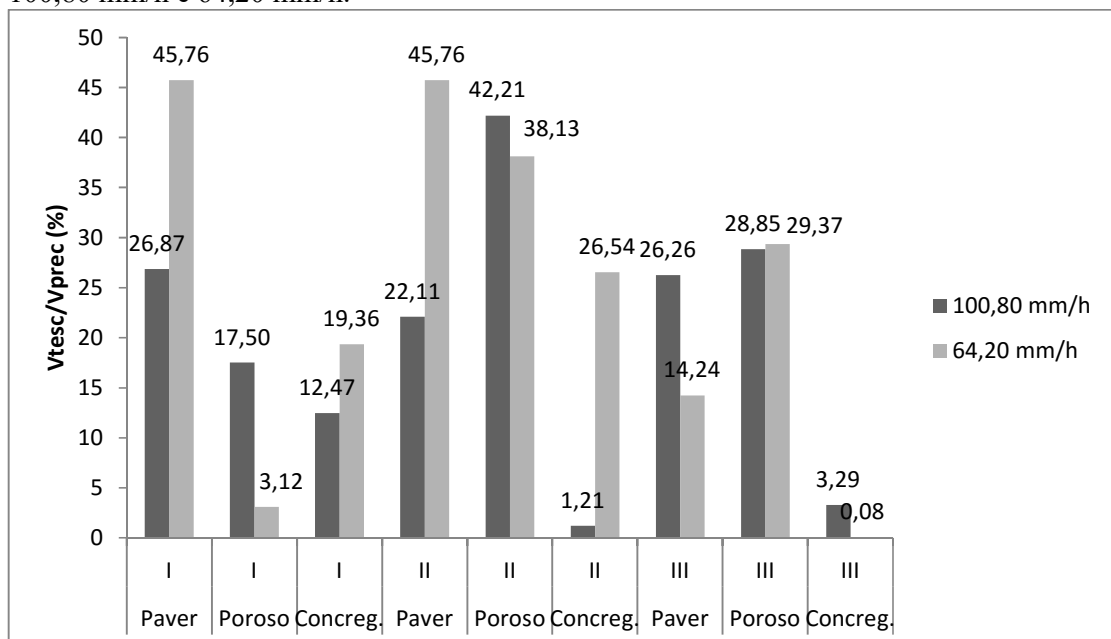
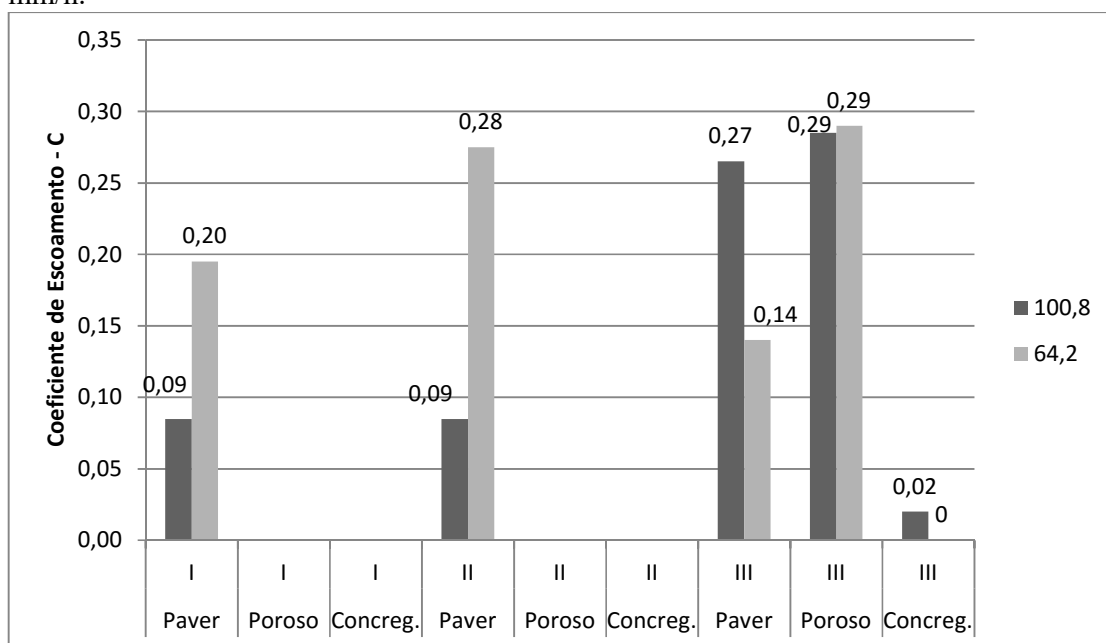


Figura 57: Relação do coeficiente de escoamento (C) na simulação de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h.



Observa-se na figura 57 que o revestimento do tipo Paver apresentou a maior relação média de volume total escoado principalmente nos dois primeiros trechos. Pela figura 58 constata-se que, neste caso, o resultado foi influenciado principalmente pela parcela escoada superficialmente, visto que nestes dois trechos apenas o revestimento Paver gerou o escoamento superficial, e conseqüentemente o coeficiente de escoamento (C). Isto ocorre porque a permeabilidade do revestimento está restrita a apenas às suas arestas. Mesmo assim, percebe-se que estes revestimentos apresentaram um bom comportamento diante da redução do escoamento superficial, pois reduziu em mais de 50 % o volume precipitado.

Caso semelhante foi verificado no trabalho desenvolvido por Silva (2006), que atribui o maior volume escoado superficialmente neste revestimento à reduzida área disponível para a infiltração. Mesmo que a redução do volume precipitado tenha sido menor que nos outros revestimentos, o autor afirma que o uso deste dispositivo ainda é um bom substituto para pavimentos impermeáveis.

Destaca-se também neste gráfico, com maior porcentagem de volume escoado do revestimento Poroso, principalmente no trecho II e III para ambas as precipitações. Lembrando que para o cálculo de  $V_{tesc}$  é realizada a soma dos volumes dos escoamentos superficial e subsuperficial, e neste caso não houve registro do primeiro escoamento (figura 58), portanto o pavimento apresentou um volume de escoamento

subsuperficial elevado, como por exemplo de 77,92 L para a chuva de 100,8 mm/h e 103,01 L para a chuva de 64,20 mm/h. Os altos valores são referentes, pela maior volume de água escoado subsuperficialmente, já que o coeficiente de escoamento foi igual a 0 (figura 58). O elevado valor no escoamento subsuperficial indica que o pavimento tem um desempenho satisfatório no amortecimento do evento de chuva.

Pode-se afirmar que o revestimento do tipo Concregrama apresentou bons resultados. Os valores de  $V_{tesc}$  no trecho III se sobressaíram em relação aos outros trechos, com o percentual de volume escoado insignificante, confirmado pelo baixo coeficiente de escoamento que foi de 0,02 e 0 para as intensidades de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h. Vale lembrar que este resultado é justificado, dentre outros fatores, pelo armazenamento da água da chuva ocasionado pela vegetação e espaços vazios que compõem o revestimento.

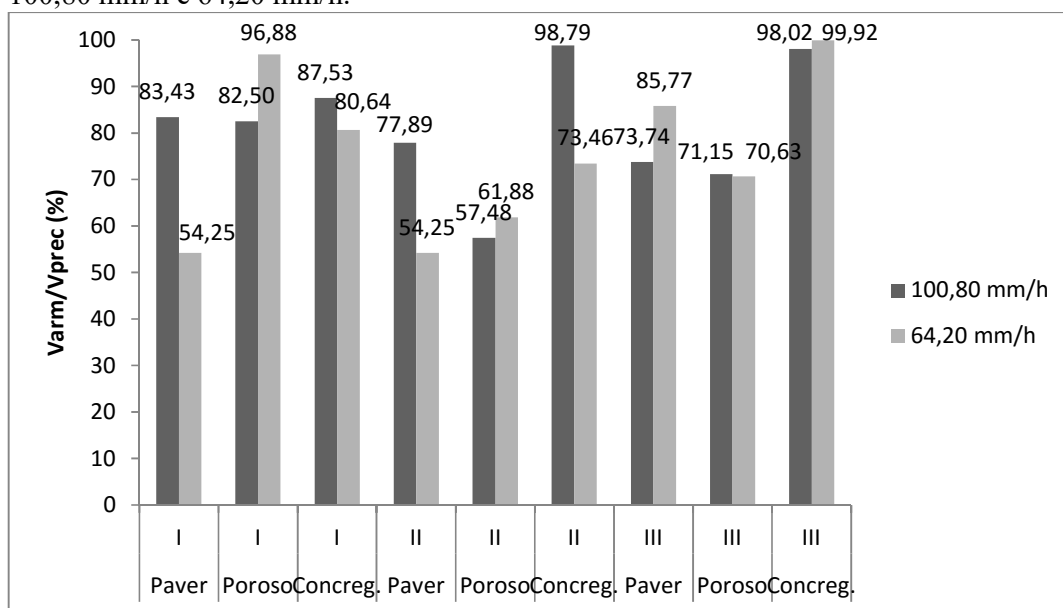
Um fator também importante no que diz respeito ao desempenho hidrológico do pavimento é o armazenamento de água em seu reservatório.

A capacidade de armazenamento de cada trecho é calculada com base na porosidade do material que compõem o substrato, equação 10. Com base na literatura a porosidade da areia e da brita 1 são 0,49 e 0,47, respectivamente (PINTO, 2011). Portanto, os volumes máximos teóricos armazenados nos trechos são: 215,04 L para o trecho I, 105,28 L para o trecho II e 60,16 L para o trecho III (calculado a partir da camada de assentamento com 4 cm de areia). Pinto (2011) afirma que a precipitação e a porosidade da base são parâmetros decisórios quando o reservatório é do tipo sem infiltração.

O volume armazenado em alguns casos ultrapassou a capacidade teórica de armazenamento do trecho. Pode-se afirmar que neste caso houve a percolação para o solo (sub-base).

As relações dos volumes armazenados e os volumes precipitados ( $V_{arm}/V_{prec}$ ) são ilustrados na figura 59 para a intensidade 100,80 mm/h e 64,20 mm/h.

Figura 58: Relação do volume armazenado (Varm) e o volume precipitado na simulação de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h.

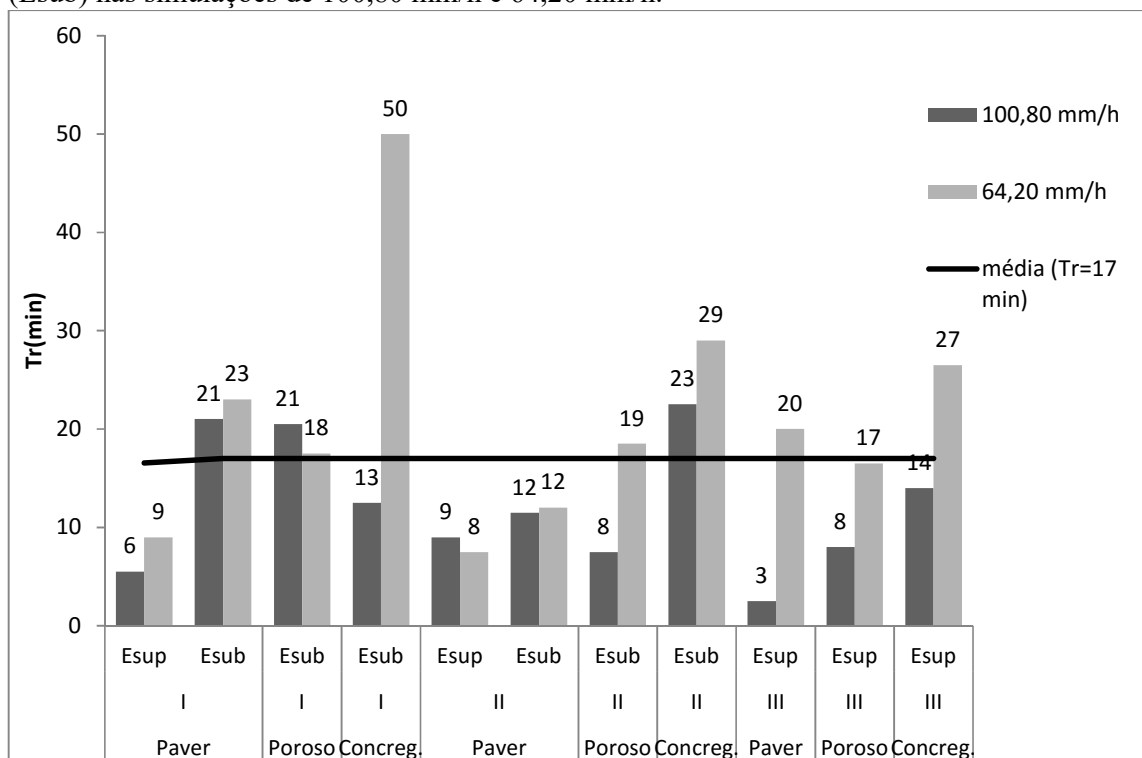


No trecho III, apesar de apresentar apenas uma camada de assentamento de 4 cm, foi o pavimento (revestimento + base) que apresentou maiores percentuais de armazenamento em relação aos outros trechos que possuem um reservatório maior. Neste trecho, pode-se afirmar que o solo (sub-base) não compactado abaixo da estrutura permite uma maior percolação da água da chuva. Diferente de outros trechos, onde o valor de Varm é atribuído em sua maioria pelo volume de água na camada de armazenamento, neste trecho, há perda de água através da sub-base.

Constata-se na figura 59 que a porcentagem de volume armazenado é significativa em todos os trechos, onde mais de 50% do volume precipitado ficou armazenado, evidenciando assim um bom desempenho desses pavimentos permeáveis na redução dos impactos causados pela impermeabilização do solo. Portanto, pelo resultado o tamanho do reservatório não foi um fator determinante para o desempenho dos pavimentos. Para a implantação de pavimentos permeáveis, a construção da estrutura similar ao trecho III é satisfatória em termos de baixos custos e na redução de escoamentos.

Outra análise realizada foi a do tempo de entrega ( $T_e$ ) para cada revestimento e trecho. Na figura 60, são ilustrados os  $T_e$ 's para as duas precipitações utilizadas.

Figura 59: Tempo de entrega (Te) para os escoamentos superficiais (Esup) e subsuperficiais (Esub) nas simulações de 100,80 mm/h e 64,20 mm/h.



De modo geral, o que se observa na figura 60 é que para a chuva de menor intensidade, o tempo de entrega foi maior.

Os pavimentos avaliados permitiram o retardo do escoamento na faixa de 3 a 50 minutos com uma média de 17 minutos. Este valor médio é superior à duração de chuvas de grande intensidade que causam inundações em área urbana (Tucci, 1997). Isto indica que este retardo possibilita um tempo de recuperação do sistema de drenagem durante o evento de chuva. Sendo assim, não é possível identificar nenhum trecho com melhor desempenho em relação ao outro quanto ao retardo do escoamento.

Os revestimentos de Concreto Poroso e Concregrama apresentaram um comportamento satisfatório em relação a entrega do escoamento, para ambas as intensidades de chuva, acima de 8 minutos. O Paver apresentou um tempo de entrega de 3 a 20 minutos para o escoamento superficial, como já citado acima a permeabilidade limitada deste revestimento dificulta a infiltração da água pluvial para as outras camadas, gerando escoamento superficial.

O quadro 11 ilustra os ajustes dos dados experimentais de infiltração ao modelo Horton. A análise dos dados de infiltração ao longo do experimento é um fator decisivo para a determinação do desempenho do pavimento.

A variação entre os parâmetros no primeiro e segundo ensaios pode ser justificada pela umidade inicial presente na estrutura dos pavimentos. Observou-se ao longo dos ensaios que os baixos valores de k estão relacionados à maior umidade da estrutura.

Quadro 11: Resumo dos ajustes do modelo de infiltração Horton.

Pavimentos	Intensidade (mm/h)	$f_c$ (mm/h)		$f_0$ (mm/h)		k ( $h^{-1}$ )	
		1º ens.	2º ens.	1º ens.	2º ens.	1º ens.	2º ens.
Paver I	100,80	65,08	90,17	100,45	100,85	55,35	108,30
	64,20	51,63	41,81	64,20	59,44	23,70	8,83
Paver II	100,80	82,34	55,61	100,80	100,80	6,81	3,89
	64,20	27,30	38,22	59,25	57,20	2,02	6,40
Paver III	100,80	50,54	89,60	97,68	101,67	14,86	31,42
	64,20	49,47	52,03	64,06	61,91	47,15	10,57
Poroso III	100,80	35,48	70,68	97,18	101,08	35,59	20,72
	64,20	35,83	27,69	59,87	52,43	17,53	2,92
Concregrama III	100,80	92,84	-	100,76	-	105,12	-
	64,20	-	59,51	-	64,26	-	37,79

Os maiores valores do coeficiente k indica em uma maior velocidade, menor tempo para atingir a infiltração final.

## 6. CONCLUSÃO

As conclusões deste trabalho foram:

- Os nove pavimentos permeáveis avaliados nesta pesquisa permitiram a redução de mais de 50% do escoamento e o retardo em média de 17 minutos do escoamento superficial, bem como o armazenamento temporário das águas pluviais.
- Mais de 50% do volume precipitado foi armazenado em todos os pavimentos. A relação  $V_{arm}/V_{prec}$  foi similar para ambas às intensidades.
- Apenas o revestimento Paver gerou escoamento superficial em todos os trechos estudados, isto está relacionado com a permeabilidade do dispositivo (restrito aos espaços vazios nas arestas).
- Apenas o revestimento do tipo Paver apresentou escoamento superficial para dos dois primeiros trechos (I e II), com o coeficiente de escoamento (C) variando de 0,09 a 0,28. Os maiores valores para a chuva de longa duração. Mesmo com a formação de escoamento superficial os valores do C foram baixos se comparados ao coeficiente de uma superfície impermeável.
- No caso do Concregrama, os orifícios do revestimento levam ao armazenamento em depressões que atenuam e retardam o escoamento.
- Em termos de coeficiente C, a estrutura que apresentou o melhor desempenho hidrológico foi o trecho I, cujos resultados variaram de 0 a 0,20.
- A umidade inicial da estrutura do pavimento é determinante no volume armazenado e escoado.
- O efeito da colmatação foi observado mesmo com o pouco uso dos pavimentos (período de 2 anos), devido provavelmente a falta de manutenção da área.
- Os valores distintos entre as réplicas podem ser justificados pelas condições de umidade inicial e da distribuição da água nas estruturas do pavimento.
- Sob a perspectiva da camada de armazenamento, os ensaios realizados sobre os três trechos não apresentaram diferenças significativas em relação ao Varm, sendo assim do ponto de vista financeiro, recomenda-se a construção similar a estrutura do trecho III.

## 7. REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L.A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2005.
- AGUIAR, J. V., LIBARDI, P. L., SAUNDERS, L. C. U., PAZ, V. P. S. Ajuste da equação de holtan modificada para um solo bruno não cálcico da região semi-árida1. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, 1998.
- ALCÂNTARA, E. H., SANTOS, M. C. F. V. **Efeitos da urbanização na hidrologia da Bacia da Laguna da Jansen**, São Luis – MA (Brasil). Anais XI SBSR, Belo Horizonte, 2003.
- ALENCAR, P. C. D. **Avaliação experimental do concreto poroso na atenuação do escoamento superficial em parcelas urbanizadas**. Dissertação de mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2013.
- ANDERSEN, C. T., FOSTER, I. D. L., PRATT, C. J. The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment. **Hydrological processes**, v. 13, n. 4, p. 597-609, 1999.
- ARAÚJO, P.R., TUCCI, C.E.M. e GOLDENFUM, J.A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 3, 2000.
- BATISTA, T. R., LUZ, S. R. e SILVA, B. C. Influência da urbanização nas vazões máximas de pequenas bacias. **Revista Hidro e Hydro**. ano 14, n. 53, 2012.
- BAPTISTA, M. B., NASCIMENTO, N. O., BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**, Porto Alegre, ABRH, 2005.
- BOGGS, J. L.; SUN, G.. Urbanization alters watershed hydrology in the Piedmont of North Carolina. **Ecohydrology**, v. 4, n. 2, p. 256-264, 2011.
- BRAGA, J. C. **Modelo hidrológico de parâmetros distribuídos para obtenção do hidrograma de escoamento superficial**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 2000.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Programa Drenagem Urbana Sustentável: manual para apresentação de propostas. 23p., 2007.
- BRAUD, I., BREIL, P., THOLLET, F., LAGOUY, M., BRANGER, F., JACQUEMINET, C., & MICHEL, K. Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France. **Journal of Hydrology**, v. 485, n. 2, p. 5-23, 2012.

- BRITO, D. S. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem.** Dissertação de mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.
- BRUNO, L. O. **Avaliação experimental de superfícies na redução do escoamento superficial direto.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Pós-Graduação em Recursos Hídricos, 2011.
- BRUNO, L. O., AMORIM, R. S. S. e SILVEIRA, Estudo da Redução do Escoamento Superficial Direto em Superfícies Permeáveis. **RBRH- Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 2, p. 237-247, 2013.
- CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle qualitativo do escoamento superficial urbano.** Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2011.
- CASTRO, T. Q. **Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis.** Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia Civil -UFG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do meio Ambiente, Goiânia, 2011.
- COLLINS, K. A., HUNT, W. F., e HATHAWAY, J. M. Evaluation of various types of permeable pavements with respect to water quality improvement and flood control. In: **8th International Conference on Concrete Block Paving**, San Francisco, CA. 2006.
- COLLISCHONN, W., TASSI, R. **Introduzindo hidrologia.** Porto Alegre: IPH UFRGS, 2008.
- COSTA, A. R., SIQUEIRA, E. Q., MENEZES FILHO, F. C. M. **Curso básico de hidrologia urbana: nível 3 /.** Brasília: ReCESA 2007.
- DIAS, F. S.; ANTUNES, P. T. S. C. **Estudo comparativo de projeto de drenagem convencional e sustentável para controle de escoamento superficial em ambientes urbanos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- DU, J., QIAN, L., RUI, H., ZUO, T., ZHENG, D., XU, Y., & XU, C. Y. Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modelling system for Qinhuai River basin, China. **Journal of Hydrology**, v. 464, p. 127-139, 2012.
- EPA. **Low impact development (LID), a literature review.** United States Environmental Protection Agency, EPA, 2000.
- FERGUSON, B. K. **Porous pavements: integrative studies in water management and land development.** Ed. Taylor & Francis, 600 p., Nova York, 2005.
- FERGUSON, B. K. Porous pavements in Georgia. **2007 Georgia Water Resources Conference**, Georgia, 2007.

- GAROTTI, Leonardo Monteiro; BARBASSA, Ademir Paceli. Estimativa de área impermeabilizada diretamente conectada e sua utilização como coeficiente de escoamento superficial. **Eng. Sanitária Ambiental**, v. 15, n. 1, p. 19-28, 2010.
- GOFORTH, G. An advancement in hydraulic modeling of porous pavement facilities, in **Proceedings of Conference and Water Quality Model User Group Meeting**, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 282 p., 1983.
- HOU, L., FENG, S., DING, Y., ZHANG, S., & HUO, Z. Experimental study on rainfall-runoff relation for porous pavements. **Hydrology Research**, v. 39, n. 3, p. 181, 2008.
- LEOPOLD, L. B. **Hydrology for urban land planning: A guidebook on the hydrologic effects of urban land use**. United States. Department of the Interior, 1968.
- LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008.
- MOURA, T. A. M. **Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial em ambientes urbanos**. Dissertação (Mestrado), Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2005.
- PAIXÃO, F. J. R., ANDRADE, A. R. S., AZEVEDO, C. A. V., SILVA, J. M., COSTA, T. L. e FEITOSA, R. M. Estimativa da Infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 5, n. 1, p. 0, 2004.
- PEITER, T. V., POLETO, C. Estudos dos efeitos de trincheiras de infiltração sobre o escoamento superficial. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 56-66, 2012.
- PINHEIRO, A., TEIXEIRA, L. P., KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Revista Ambiente e Água**, v. 4, n. 2, 2009.
- PINTO, L.L.C.A. **O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano**. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011.
- PINTO, N. L. S., HOLTZ, A. C. T., MARTINS, J. A., GOMIDE, F. L. S. Hidrologia básica. São Paulo: Ed. Edgard Blücher. 1976. 278p.
- PRUSKI, F. F., RODRIGUES, L. N. e SILVA, D. D. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, 2001.
- RAMOS, C. L., BARROS, M. T. L., PALOS, J. C. F. **Diretrizes básicas para projetos de drenagem urbana no município de São Paulo**. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica–FCTH, 1999.

- RIGHETTO A. M. (coord). **Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.
- RUSHTON, B. T. Low-impact parking lot design reduces runoff and pollutant loads. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, n. 3, p. 172-179, 2001.
- SALES, T. L. **Pavimento Permeável com Superfície em Blocos de Concreto de Alta Porosidade**. Dissertação (Mestrado) - UFSC, Florianópolis, 2008.
- SCHOLZ, M. e GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**, v. 42, n. 11, p. 3830-3836, 2007.
- SCHNOOR, J. L. **Environmental Modeling: fate and transport of pollutants in water, air, and soil**. New York, John Wiley and Sons, 682p.1996.
- SENER, E. M. **Porous concrete pavement construction: opportunity for alternative drainage methodology emphasis in construction education**. Spring 2007 American Society for Engineering Education Illinois-Indiana Section Conference. Indiana, 2007
- SHINMA, T. A. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.
- SILVA, G. B. L. **Avaliação Experimental Sobre a Eficiência de Superfícies Permeáveis com Vistas ao Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas**. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.TD-01/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006
- SILVEIRA, A.L.L. **Drenagem Urbana: Aspectos de Gestão**. Editora da Universidade UFRGS. 1 ed., Porto Alegre, 2002.
- SILVEIRA G. L. **Cobrança pela drenagem urbana de águas pluviais: incentivo à Sustentabilidade**.2008. Disponível em:  
<[http://hidroprojetos.ctlab.ufsm.br/gerhi/downloads/Relatorio\\_Geraldo\\_Final-AGOSTO.pdf](http://hidroprojetos.ctlab.ufsm.br/gerhi/downloads/Relatorio_Geraldo_Final-AGOSTO.pdf)>  
Acesso em: 30/06/2012.
- SMDU. **Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: gerenciamento do sistema de drenagem urbana**. São Paulo, 2012.
- SOUSA JUNIOR, S. F. **Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuva para estudos hidrológicos urbanos**. Dissertação (mestrado) Escola de Engenharia Civil - UFG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia do meio Ambiente, Goiânia, 2011.
- SOUZA, C. F.; CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C.E.M. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 2, p 9-18, 2012.

- TAVANTI, D. R. **Desenvolvimento de baixo impacto aplicado ao processo de planejamento urbano**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: UFSCar, 2009.
- TAVANTI, D. R., BARBASSA, A. P. Análise dos Desenvolvimentos Urbanos de Baixo Impacto e Convencional. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 17-28, 2012.
- TENNIS, P. D., LEMING, M. L., e AKERS, D. J. **Pervious concrete pavements**. Portland Cement Association. Skokie, IL 2004.
- TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. In: TUCCI, C. E. M., PORTO, R.L.L., BARROS, M.T. Drenagem urbana. Porto Alegre: Ed.da UFRGS:ABRH, 1995
- TUCCI, C. E.M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 61-68, 2000.
- TUCCI, C. E.M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - World Bank – Unesco, 2005.
- TUCCI, C. E. M.. **Drenagem urbana**. Cienc. Cult., São Paulo, v. 55, n. 4, Dec. 2003. Disponível em: <[http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0009-67252003000400020&lng=en&nrm=iso](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252003000400020&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 04 Mar. 2013.
- TUCCI, C. E. M., HESPANHOL, I., CORDEIRO NETTO, O. M. Cenários da gestão da água no Brasil: uma contribuição para a “Visão Mundial da Água”. **Bahia análise & dados**. v. 13, n. ESPECIAL. p. 357-370. Salvador, 2003.
- TUCCI, C. E.M; PORTO, R. L.; BARROS, M. T.D. Drenagem urbana. In: **Drenagem urbana**. ABRH/UFRGS, 1995.
- TUCCI, C. E.M. **Gestão de águas pluviais urbanas**. Brasília :Ministério das Cidades, 194p. Saneamento para Todos; 4º volume, 2006.
- TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: Abrh,. 943 p. 1997.
- UDFCD, Urban Drainage Flood Control District. **Urban Storm Drainage Criteria Manual**, v. 3, 2010.
- WOODS-BALLARD, B., KELLAGHER, R, MARTIN, P, JEFFERIES, C, BRAY, R, SHAFFER, P. **The SUDS Manual**. Londres. Ciria, 2007.