

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTUDO EXPERIMENTAL DE SUPERFÍCIES
PERMEÁVEIS PARA O CONTROLE DO ESCOAMENTO
SUPERFICIAL EM AMBIENTES URBANOS

THALES AUGUSTUS MOREIRA MOURA

ORIENTADOR: NÉSTOR ALDO CAMPANA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM - 078/05

BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE SUPERFÍCIES PERMEÁVEIS PARA
O CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM AMBIENTES
URBANOS**

THALES AUGUSTUS MOREIRA MOURA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

Prof. Néstor Aldo Campana, DSc (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Nabil Joseph Eid, DSc (ENC-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Eduardo Queija de Siqueira, PhD (UFG)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 27 DE JUNHO DE 2005

FICHA CATALOGRÁFICA

MOURA, THALES AUGUSTUS MOREIRA	
Estudo Experimental de Superfícies Permeáveis Para o Controle do Escoamento Superficial em Ambientes Urbanos [Distrito Federal] 2005.	
xix, 117p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2005). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.	
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Superfícies permeáveis	2. Drenagem urbana
3. Simulação de chuva	
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOURA, T. A. M. (2005). Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial em ambientes urbanos. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-078/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thales Augustus Moreira Moura

TÍTULO: Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial em ambientes urbanos

GRAU: Mestre

ANO: 2005

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Thales Augustus Moreira Moura

Rua 44, nº 45, Quadra 74, Lote 06, Vila Carvelo

75.380-000 Trindade – GO – Brasil.

Dedico esse trabalho a minha família:
Juvenal, Neusa, César e Vinícius,
por todo o apoio dado para a conclusão do meu curso de mestrado.
À minha avó Maria, pelo seu exemplo de vida.
À Flávia, por seu carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Néstor A. Campana pela orientação desse trabalho.

Aos professores Sérgio Koide, Nabil J. Eid, Cristina C. S. Brandão, Marco A. A. de Souza, Oscar de M. C. Netto e Ricardo S. Bernardes, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos meus colegas e amigos do mestrado e do doutorado: Camila, Cristiane, Cristina, Daidi, Daniella, Edson, Fernan, Fuad, Gustavo Eccard, Itonaga, Jailma, Jazielli, José Ricardo, Juliana, Luciana, Miguel, Pablo, Pufal, Rosângela, Selma, Simone, Simoneli, Socorro e Viviane. Agradeço também aos novos colegas do mestrado: Ana Elisa, Cláudia, Rafael e Renata.

Aos meus colegas de apartamento: Ítalo, Cleverson, Clever, Paulo e André, pela amizade e convivência.

Ao condomínio Alto da Boa Vista, especialmente ao Eng. Feliciano de Abreu e ao técnico Lourivaldo.

À colega Vanusa pelos primeiros contatos com a área de drenagem urbana.

Aos meus amigos e colegas Gustavo Barbosa e Jussanã Milograna, pelas contribuições ao trabalho.

Aos meus amigos Rodolfo, Gleyson, Fábio, Alexandre, Leandro e Henrique, por me acolherem quando eu estava sem um lugar para morar aqui em Brasília.

Aos professores. Alfredo R. da Costa e José V. G. de Araújo, pelas cartas de recomendação, e a professora Lúcia H. de Oliveira, pelos primeiros passos na pesquisa científica.

Aos meus tios Célia e Pedron, e a José Vaz e Laurita, pela ajuda no processo de aluguel do apartamento que morei enquanto estive em Brasília.

À arquiteta do CEPLAN Vanessa Novaes, pelo fornecimento do projeto urbanístico do Campus da Universidade de Brasília.

À Capes, pelo apoio financeiro.

À minha família que rezou e sofreu junto comigo nesse período de mestrado.

Àquelas pessoas que por descuido não foram citadas, mas que muito contribuíram para a realização do meu trabalho.

A Deus, por tudo.

RESUMO

ESTUDO EXPERIMENTAL DE SUPERFÍCIES PERMEÁVEIS PARA O CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM AMBIENTES URBANOS

Autor: Thales Augustus Moreira Moura

Orientador: Néstor Aldo Campana

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, Junho de 2005

O trabalho consistiu na realização de estudos em parcelas experimentais com vista a avaliar e medir o escoamento superficial e a taxa de infiltração observada em três tipos de superfícies permeáveis, além de uma análise comparativa do desempenho dessas superfícies com relação à superfície gramada tomada como referência. Por meio dos dados experimentais obtidos foi realizado um estudo de caso em uma área de estacionamento onde se procurou avaliar o impacto na geração do escoamento superficial das superfícies de asfalto, chão batido, blocos maciços e blocos vazados em relação à superfície gramada. Os resultados mostraram que o chão batido fez com que o coeficiente de escoamento aumentasse quase quatro vezes em relação à superfície gramada, comprovando que a retirada da vegetação e compactação do solo causam impacto no escoamento superficial da bacia hidrográfica. Quanto aos blocos maciços, o impacto no escoamento chegou a ser de quase seis vezes o da superfície gramada. No geral, a compactação dessas superfícies chegou a reduzir pela metade o valor de infiltração para as superfícies de base não compactada. Os blocos vazados foram as estruturas mais eficientes no controle do escoamento superficial, sendo em certos casos mais eficientes que a superfície gramada. A colmatação por sedimentos e a passagem de veículos reduziu muito a infiltração para as superfícies de blocos maciços e vazados. A colmatação por sedimentos fez com que o coeficiente de escoamento aumentasse quase sessenta vezes para a superfície de blocos vazados sem a compactação da base.

O estudo de caso procurou avaliar a partir dos dados experimentais, o impacto de diferentes coberturas no escoamento superficial em uma área de estacionamento. Para a cobertura do estacionamento foram utilizadas as superfícies de grama, chão batido, blocos maciços, blocos vazados e o asfalto. Para a análise do impacto no escoamento foram verificados a vazão máxima, o tempo de ascensão e o volume do hidrograma para cada cobertura. Para as superfícies de asfalto, chão batido e blocos maciços foram gerados volumes excedentes que foram controlados por meio de um reservatório de detenção.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL STUDY OF PERMEABLE SURFACES FOR THE CONTROL OF SUPERFICIAL DISCHARGE IN URBAN ENVIRONMENTS

Author: Thales Augustus Moreira Moura

Supervisor: Néstor Aldo Campana

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, June of 2005

The work consisted of the accomplishment of studies in experimental parcels with sight to evaluate and to measure the superficial discharge and the infiltration rate observed in three types of permeable surfaces, beyond a comparative analysis of the performance these surfaces with relation to the gramada surface taking as reference. By means of experimental datas obtained was realized a study of case in a parking area wherein if searched to evaluate the impact in the generation of the superficial discharge from the surfaces of asphalt, beaten soil, massive blocks and blocks leaked in relation to the grass surface. The results had shown that the beaten soil made with that the discharge coefficient increased almost four times in relation to the grass surface, proving that the withdrawal of the vegetation and compacting of the ground cause impact in the superficial discharge of the hydrography basin. In relation the massive blocks, the impact in the discharge almost arrived to be of six times of the grass surface. In the generality, the compacting of these surfaces arrived to reduce for the half the value of infiltration for the surfaces of not compact base. The leaked blocks had been the structures most efficient in the control of the superficial discharge, being in certain cases more efficient than the grass surface. The fulfilling of the emptinesses for sediments and the passage of vehicles reduced the infiltration for the surfaces of massive and leaked blocks. The fulfilling of the emptinesses for sediments made with that the discharge coefficient increased almost sixty times for the surface of leaked blocks without the compacting of the base.

The case study searched to evaluate from the experimental datas, the impact of different coverings in the superficial discharge in a parking area. For the covering of the parking had been used the surfaces of grass, beaten soil, massive blocks, leaked blocks and asphalt. For the analysis of the impact in the discharge had been verified the maximum outflow, the time of ascension and the volume of the hydrograph for each covering. For the asphalt surfaces, beaten soil and massive blocks had been generated exceeding volumes that had been controlled by means of a reservoir of detention.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. IMPACTOS HIDROLÓGICOS DA URBANIZAÇÃO.....	4
3.1.1. Impacto do desenvolvimento urbano no ciclo hidrológico.....	5
3.1.2. Impacto ambiental sobre o meio aquático.....	8
3.2. SISTEMAS SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM URBANA.....	11
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
4.1. ESCOAMENTO SUPERFICIAL E INFILTRAÇÃO.....	24
4.2. EQUAÇÕES PARA O RESERVATÓRIO.....	31
4.3. ONDA CINEMÁTICA.....	33
5. METODOLOGIA.....	39
5.1. REALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE CHUVA NAS SUPERFÍCIES PERMEÁVEIS.....	39
5.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....	43
5.3. CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM ÁREAS DE ESTACIONAMENTO.....	44
6. RESULTADOS DO ESTUDO EXPERIMENTAL E DO ESTUDO DE CASO.....	48
6.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS EM PARCELAS EXPERIMENTAIS.....	48
6.1.1. Superfície Gramada.....	48
6.1.2. Chão batido.....	52
6.1.3. Blocos maciços.....	54
6.1.3.1. Blocos maciços sem a compactação da base.....	54
6.1.3.2. Blocos maciços com a compactação de base.....	64
6.1.4. Blocos vazados.....	73
6.1.4.1. Blocos vazados sem a compactação de base.....	73
6.1.4.2. Blocos vazados com a compactação de base.....	82
6.1.5. Análise global dos resultados.....	91
6.2. ESTUDO DE CASO.....	92

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
APÊNDICES.....	113
APÊNDICE A – CLASSIFICAÇÃO E GRANULOMETRIA DOS	
SOLOS.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Processos que ocorrem numa área urbana.....	5
Figura 3.2 – Impactos devido à urbanização.....	6
Figura 3.3 – Relação entre vazão depois e antes da urbanização.....	7
Figura 3.4 – Plano de infiltração.....	15
Figura 3.5 – Valo de infiltração.....	16
Figura 3.6 – Bacia de infiltração.....	17
Figura 3.7 – Bacia de percolação.....	17
Figura 3.8 – Entradas permeáveis de drenagem.....	18
Figura 3.9 – Trincheira de infiltração.....	19
Figura 3.10 – Meio fio permeável.....	19
Figura 3.11 – Pavimento permeável.....	20
Figura 4.1 – Hidrograma e curva da taxa de infiltração resultantes de uma chuva constante.....	24
Figura 4.2 – Curvas de infiltração para diferentes intensidades de precipitação.....	27
Figura 4.3 – Curva da capacidade de infiltração.....	27
Figura 5.1 – Foto aérea com o detalhe do local do experimento.....	39
Figura 5.2 – Detalhe do quadro metálico instalado nas superfícies permeáveis.....	40
Figura 5.3 – Superfícies permeáveis: (a) grama; (b) chão batido.....	41
Figura 5.4 – Superfícies permeáveis: (a) blocos maciços; (b) blocos vazados.....	41
Figura 5.5 – Detalhe do simulador de chuva utilizado no experimento.....	42
Figura 5.6 – Exemplo do funcionamento do simulador de chuva.....	42
Figura 5.7 – Estacionamento com o detalhe dos planos do estacionamento.....	45
Figura 5.8 – Detalhe das estruturas utilizadas para controle do escoamento superficial.....	46
Figura 5.9 – Reservatório de retenção para o armazenamento do excesso de escoamento.....	47
Figura 6.1 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	49
Figura 6.2 – Resultado de todas as simulações no período úmido/2005: (a) hidrogramas da superfície gramada; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície gramada.....	49

Figura 6.3 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	52
Figura 6.4 – Resultado de todas as simulações no período úmido/2005: (a) hidrogramas da superfície de chão batido; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície de chão batido.....	52
Figura 6.5 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	55
Figura 6.6 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BM 2%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BM 2%.....	56
Figura 6.7 – Simulação 4 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	56
Figura 6.8 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BM 2%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BM 2%.....	57
Figura 6.9 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	60
Figura 6.10 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BM 7%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BM 7%.....	60
Figura 6.11 – Simulação 5 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	61
Figura 6.12 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BM 7%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BM 7%.....	61
Figura 6.13 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	64

Figura 6.14 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BMBC 2%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BMBC 2%.....	65
Figura 6.15 – Simulação 3 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	65
Figura 6.16 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BMBC 2%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BMBC 2%.....	66
Figura 6.17 – Simulação 2 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	69
Figura 6.18 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BMBC 6%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BMBC 6%.....	69
Figura 6.19 – Simulação 5 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	70
Figura 6.20 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BMBC 6%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BMBC 6%.....	70
Figura 6.21 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	74
Figura 6.22 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BV 2%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BV 2%.....	74
Figura 6.23 – Simulação 5 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	75
Figura 6.24 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BV 2%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BV 2%.....	75

Figura 6.25 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	78
Figura 6.26 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BV 7%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BV 7%.....	79
Figura 6.27 – Simulação 5 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	79
Figura 6.28 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BV 7%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BV 7%.....	80
Figura 6.29 – Simulação 2 ($i = 156$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	83
Figura 6.30 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BVBC 2%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BVBC 2%.....	83
Figura 6.31 – Simulação 3 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	84
Figura 6.32 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BVBC 2%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BVBC 2%.....	84
Figura 6.33 – Simulação 1 ($i = 156$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	87
Figura 6.34 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BVBC 6%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BVBC 6%.....	87
Figura 6.35 – Simulação 3 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste das equações de Horton e Philip aos dados observados.....	88

Figura 6.36 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BVBC 6%; (b) curvas das taxa de infiltração da superfície do BVBC 6%.....	88
Figura 6.37 – Ajuste do coeficiente de rugosidade de Manning: (a) BMBC 2%, $n = 0,015$; (b) BVBC 2%, $n = 0,010$	93
Figura 6.38 – Ajuste do coeficiente de rugosidade de Manning: (a) Chão batido 3,5%, $n = 0,015$; (b) Grama 2%, $n = 0,20$	93
Figura 6.39 – Hidrogramas de escoamento para o plano 5 ($A = 1600 \text{ m}^2$) com o tempo de retorno de 10 anos ($i = 157 \text{ mm/h}$).....	99
Figura 6.40 – Hidrograma da área de estacionamento para o tempo de retorno de 2 anos ($i = 122 \text{ mm/h}$).....	100
Figura 6.41 – Hidrograma da área de estacionamento para o tempo de retorno de 5 anos ($i = 141 \text{ mm/h}$).....	100
Figura 6.42 – Hidrograma da área de estacionamento para o tempo de retorno de 10 anos ($i = 157 \text{ mm/h}$).....	101
Figura 6.43 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório: (a) Asfalto, $T = 2$ anos; (b) Asfalto, $T = 5$ anos.....	102
Figura 6.44 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório: (a) Asfalto, $T = 10$ anos; (b) BMBC 2%, $T = 2$ anos.....	102
Figura 6.45 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório: (a) BMBC 2%, $T = 5$ anos; (b) BMBC 2%, $T = 10$ anos.....	103
Figura 6.46 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório: (a) Chão batido, $T = 2$ anos; (b) Chão batido, $T = 5$ anos.....	103
Figura 6.47 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório para o Chão batido, $T = 10$ anos.....	104
Figura A1 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de grama e chão batido.....	114
Figura A2 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de BV 2% e BM 2%.....	115
Figura A3 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de BM 7%.....	115
Figura A4 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de BV 7%.....	116
Figura A5 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de BMBC 2%.....	116
Figura A6 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de BVBC 6%.....	117
Figura A7 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de BMBC 6% e BVBC 2%.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas.....	8
Tabela 3.2 – Parâmetros de caracterização das águas pluviais.....	10
Tabela 3.3 – Medida de controle das inundações.....	12
Tabela 4.1 – Valores de C adotados pela Prefeitura de São Paulo.....	26
Tabela 6.1 – Resumo das simulações para a superfície gramada.....	50
Tabela 6.2 – Resumo das simulações para a parcela de chão batido.....	53
Tabela 6.3 – Resumo das variáveis das simulações para o BM 2%.....	57
Tabela 6.4 – Resumo dos parâmetros das simulações para a parcela de BM 7%.....	62
Tabela 6.5 – Resumo das simulações na parcela experimental de BMBC 2%.....	66
Tabela 6.6 – Resumo dos parâmetros das simulações na parcela de BMBC 6%.....	71
Tabela 6.7 – Resumo das simulações da parcela de BV 2%.....	76
Tabela 6.8 – Resumo das simulações da parcela de BV 7%.....	80
Tabela 6.9 – Resumo das simulações na superfície de BVBC 2%.....	85
Tabela 6.10 – Resumo das simulações na superfície de BVBC 6%.....	89
Tabela 6.11 – Resumo geral de todos os parâmetros das superfícies permeáveis.....	91
Tabela 6.12 – Verificação da aplicabilidade dos critérios da onda cinemática.....	94
Tabela 6.13 – Curvas teóricas de infiltração utilizadas no estudo de caso.....	95
Tabela 6.14 – Parâmetros do hidrograma para a superfície de asfalto.....	95
Tabela 6.15 – Parâmetros do hidrograma para a superfície com blocos maciços.....	96
Tabela 6.16 – Parâmetros do hidrograma para a superfície de chão batido.....	97
Tabela 6.17 – Parâmetros do hidrograma para a superfície gramada.....	97
Tabela 6.18 – Parâmetros do hidrograma para a superfície de blocos vazados.....	98
Tabela 6.19 – Parâmetros característicos dos hidrogramas das superfícies.....	99
Tabela 6.20 – Volume de armazenamento e área do reservatório para cada superfície.....	104
Tabela A1 – Classificação do solo para a superfície permeável.....	114

LISTA DE SÍMBOLOS

A – condutividade hidráulica (mm/h)

A_d – área do descarregador de fundo (m^2)

A_{i+1}^{j+1} – área da seção no espaço $i+1$ e no tempo $j+1$

A_s – área da seção (m^2)

BM – bloco maciço sem a compactação da base

BMBC – bloco maciço com a compactação da base

BV – bloco vazado sem a compactação da base

BVBC – bloco vazado com a compactação da base

C – coeficiente de escoamento (adimensional)

C – coeficiente de descarga do vertedor (adimensional)

C_d – coeficiente de descarga (adimensional)

D – somatório do quadrado da diferença entre as infiltrações observadas e a média das infiltrações observadas

D_m – altura média de lâmina do escoamento

D_r – detenção superficial recuperável do escoamento

$F = \frac{V_o}{\sqrt{g \cdot y_o}}$ – número de Froude (adimensional)

$f(t)$ – infiltração no tempo t (mm/h)

$F(t_u)$ – curva da taxa real de infiltração

g – aceleração da gravidade (m/s^2)

H – diferença de nível entre a montante e a jusante do reservatório (m)

i – intensidade da precipitação (mm/h)

I_b – capacidade de infiltração final (mm/h)

i_c – infiltração de base (mm/h)

I_o – capacidade de infiltração inicial (mm/h)

I_t – capacidade de infiltração no tempo t (mm/h)

I_t e I_{t+1} – vazões de entrada no reservatório nos tempos t e $t+1$

K – constante que representa a taxa de decréscimo na capacidade I_t (1/h)

$K = \frac{S_o \cdot L_o}{F^2 \cdot y_o}$ – índice K (adimensional)

L – largura do vertedor (m)

$L(t_u)$ – lamina total escoada
 L_o – comprimento longitudinal do escoamento (m)
 n – coeficiente de rugosidade de Manning (adimensional)
 N – somatório do quadrado da diferença entre as infiltrações observadas e calculadas
 q – vazão suplementar por unidade de comprimento das margens
 $Q(t)$ – hidrograma de escoamento superficial
 Q_d – vazão do descarregador de fundo (m^3/s)
 q_{i+1}^{j+1} – Vazão suplementar por unidade de comprimento no espaço $i+1$ e no tempo $j+1$
 Q_{i+1}^{j+1} – vazão no espaço $i+1$ e no tempo $j+1$
 Q_o – vazão (mm/h)
 Q_p – vazão de pico (L/s)
 Q_t e Q_{t+1} – vazões de saída do reservatório nos tempos t e $t+1$
 Q_v – vazão do vertedor (m^3/s)
 Q_x – vazão constante
 R – relação entre vazão depois e antes da urbanização
 R^2 – coeficiente de determinação (adimensional)
 S – parâmetro de absorção do solo ($mm/h^{1/2}$)
 $S(t)$ – lamina total armazenada na superfície
 S_f – declividade da linha de energia
 $S_i(t)$ – escoamento retido nas depressões
 S_o – declividade do plano de escoamento
 S_t e S_{t+1} – armazenamentos nos tempos t e $t+1$
 T – período da onda (s)
 T – tempo de retorno (anos)
 t_a – tempo de ascensão do hidrograma
 t_c – tempo de concentração (min)
 t_e – tempo de embebição (s)
 t_f – término do escoamento superficial (s)
 t_m – tempo de início do regime permanente (s)
 t_r – diferença entre t_f e t_u (s)
 t_u – duração da precipitação (s)
 $V(l)$ – volume do hidrograma (L)
 V_{esc} – volume escoado (L)

V_o – velocidade (m/s)

V_{prec} – volume precipitado (L)

$W(t)$ – lamina total infiltrada

y – posição da lâmina de água na posição x e no tempo t

y_o – profundidade média (mm)

Z – cota de água no reservatório (m)

Z_w – cota de crista do vertedor (m)

Δt – intervalo de tempo da simulação (s)

α – parâmetro relacionamento Q a A

β – parâmetro relacionamento Q a A

$\frac{T \cdot S_o \cdot V_o}{y_o} \geq 171$ - desigualdade de Ponce

1. INTRODUÇÃO

O surgimento dos grandes centros urbanos no século XIX e o intenso processo de urbanização no século XX fez com que houvesse uma grande mudança no uso e ocupação do solo. O solo, inicialmente encontrado numa condição de pré-urbanização (coberto por vegetação), acabou sendo impermeabilizado pelas superfícies de concreto e asfalto e pela construção de casas e edifícios. Com isso houve um grande incremento no escoamento superficial. Os sistemas tradicionais de micro e macrodrenagem urbana logo se mostraram sistemas insustentáveis, pois apenas transferem o escoamento na bacia hidrográfica, sem atacar a fonte do problema.

A partir desse problema, surgiu o conceito de drenagem urbana sustentável, que prega que a cheia natural em uma bacia hidrográfica não deve ser aumentada. O controle do escoamento superficial deve ser feito na fonte, através de infiltração, percolação e armazenamento. Entre as estruturas que promovem a infiltração, existem as superfícies permeáveis, que podem ser usadas em área de estacionamento ou vias de pouco tráfego substituindo as superfícies impermeáveis.

Para que essas superfícies permeáveis possam ser utilizadas nos ambientes urbanos como alternativa para controle do escoamento superficial, o seu comportamento deve ser estudado. Esse trabalho apresenta o estudo do comportamento de quatro tipos de superfícies permeáveis: grama, que representou a situação original de ocupação do solo; chão batido, blocos maciços e blocos vazados, que representaram a nova situação de ocupação do solo.

Para cada uma dessas superfícies foi delimitada uma área experimental de 1 m^2 , onde eram feitas simulações de chuva a fim de poder avaliar o comportamento do escoamento e infiltração nas parcelas de chão batido, blocos maciços e blocos vazados em relação a parcela experimental de grama.

A fim de se fazer uma avaliação dos parâmetros experimentais de infiltração obtidos nas superfícies permeáveis foi proposto um estudo de caso em uma área de estacionamento

pertencente ao novo edifício do Instituto de Biologia da Universidade de Brasília. Esse estudo de caso seguiu os novos conceitos sustentáveis de drenagem urbana, através da utilização de um reservatório de retenção para o controle do excesso de escoamento superficial gerado pelas superfícies de chão batido, blocos vazados e blocos maciços em relação à superfície gramada. O escoamento superficial dessas superfícies permeáveis foi comparado com a cobertura de asfalto, que teve adotado um valor nulo para a infiltração e um valor para a rugosidade da superfície baseado na literatura técnica especializada.

2. OBJETIVOS

Os objetivos desse trabalho são:

- quantificar e comparar a eficiência das superfícies de chão batido, blocos maciços e blocos vazados na redução do escoamento superficial tendo como referência à superfície gramada;
- avaliar o impacto que a colmatação por sedimentos e passagem de veículos gera no escoamento superficial para as superfícies de blocos maciços e vazados;
- a fim de fazer uma avaliação dos dados experimentais obtidos, foi realizado um estudo de caso em uma área de estacionamento. Este estudo de caso teve por objetivo avaliar o impacto hidrológico que as superfícies de asfalto, de chão batido, blocos maciços e blocos vazados tiveram em relação à superfície gramada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. IMPACTOS HIDROLÓGICOS DA URBANIZAÇÃO

As mudanças de uso e ocupação do solo podem ser feitas por desmatamento, reflorestamento, agricultura, drenagem de áreas alagáveis e pela impermeabilização. A urbanização é o processo de incremento da população urbana com respeito a rural, sendo que a impermeabilização é uma importante mudança de uso e ocupação de solo ocorrida. A urbanização traz consigo importantes impactos hidrológicos para a bacia hidrográfica.

Numa bacia não urbanizada ocorre o sistema natural de controle distribuído. A vegetação, as depressões naturais, os planos de inundação e solos permeáveis, que fazem parte do sistema natural de controle distribuído, aumentam a infiltração, a retenção temporária e a evapotranspiração na bacia hidrográfica. A natureza utiliza essas características para armazenar e atenuar o escoamento antes de lançá-lo para os cursos de água. Esses mecanismos naturais e os benefícios hidrológicos são quebrados pela urbanização. Isso traz inúmeros efeitos negativos (Andoh e Declerck, 1997);(Makropoulos *et al.*, 1999).

O impacto causado pela urbanização pode ocorrer sobre a quantidade de água (aumento do escoamento superficial, podendo causar inundações) e qualidade da água. A Figura 3.1 mostra os impactos devido à urbanização e como se inter-relacionam os diversos processos que ocorrem na área urbana.

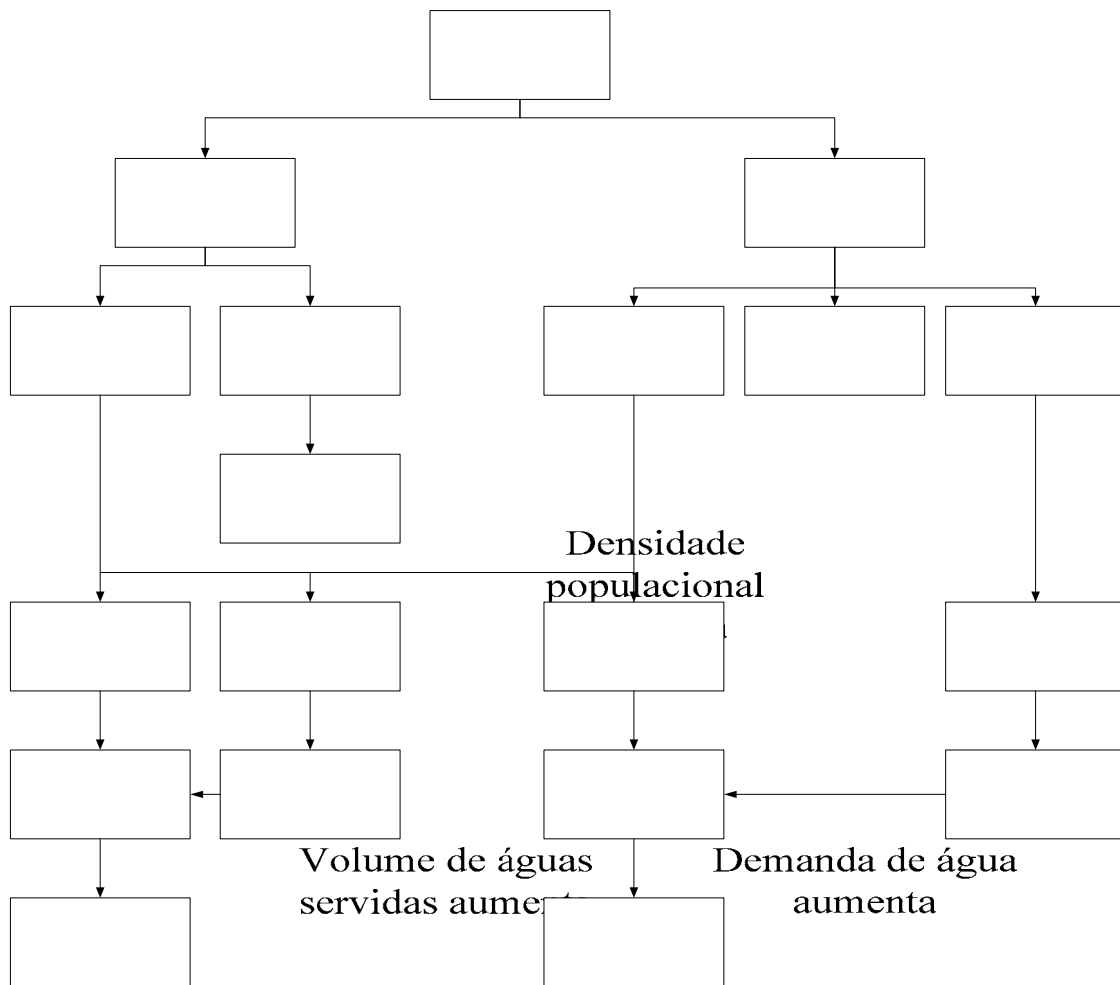


Figura 3.1 – Processos que ocorrem numa área urbana (Hall, 1984 *apud* Porto *et al.*, 1993)

3.1.1 – Impacto do desenvolvimento urbano no ciclo hidrológico

Problema de disponibilidade de recursos hídricos

O desenvolvimento urbano altera a cobertura vegetal provocando vários efeitos que alteram os componentes do ciclo hidrológico natural. Com urbanização são alterados os volumes de escoamento e as vazões de pico, além de ser alterada a duração do escoamento superficial. Os tempos de ascensão, de recessão e ao pico dos hidrogramas tem seus valores reduzidos. A urbanização também provoca a perda de armazenamento nas depressões do terreno natural. A Figura 3.2 mostra as alterações hidrológicas ocorridas da passagem de uma área rural para uma área urbana.

Qualidade dos cursos receptores deteriora

Vazões básicas diminuem

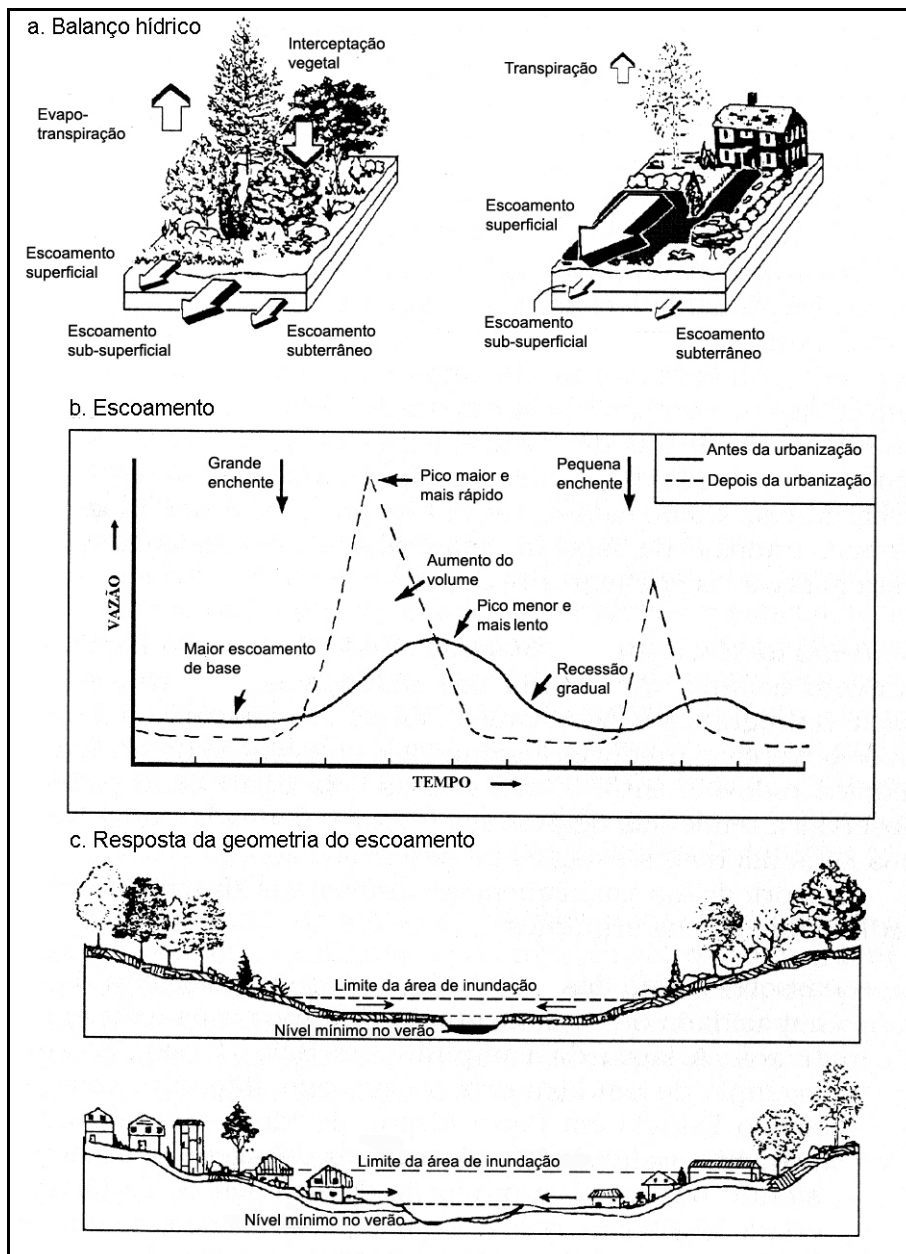


Figura 3.2 – Impactos devido à urbanização (Schueler, 1987 *apud* Tucci, 2003c)

Com a urbanização são introduzidas as seguintes alterações no ciclo hidrológico (Tucci, 2003a):

- redução do volume de infiltração;
- aumento do escoamento superficial;
- com a redução da infiltração, o aquífero tende a diminuir o nível do lençol freático pela redução da alimentação, reduzindo o escoamento subterrâneo;
- devido à substituição da cobertura vegetal ocorre uma redução da evapotranspiração.

Baseado em dados de vazões observadas em várias bacias de drenagem nos Estados Unidos, Leopold (1968) *apud* Wong (1993) mostrou que para bacias de tamanho normalizado de 1 mi² (2,6 km²), a urbanização poderia causar um acréscimo no pico de vazão média anual de até 6 vezes. A Figura 3.3 é o gráfico resultante, onde a urbanização é expressa em termos da impermeabilidade da bacia e da porcentagem da área com condutos.

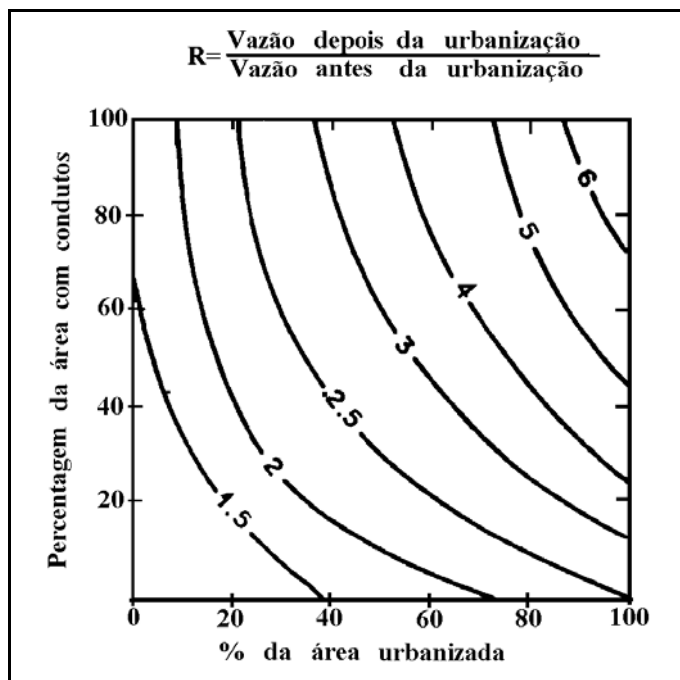


Figura 3.3 – Relação entre vazão depois e antes da urbanização (R) (Leopold, 1968 *apud* Porto *et al.*, 1993)

Esse aumento do escoamento superficial causado pela urbanização ainda pode agravar o problema da saúde pública por meio das doenças de veiculação hídrica. Algumas doenças trazidas pelas inundações urbanas são: leptospirose, esquistossomose, malária, cólera, febre tifóide, dengue, poliomielite e disenteria. Além da impermeabilização do solo, existem outros fatores que podem agravar as inundações urbanas, como os apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Causas e efeitos da urbanização sobre as inundações urbanas (Porto *et al.*, 1993).

CAUSAS	EFEITOS
Impermeabilização	-Maiores picos e vazões
Redes de drenagem	-Maiores picos a jusante
Lixo	-Degradação da qualidade da água -Entupimento de bueiros e galerias
Redes de esgotos deficientes	-Degradação da qualidade da água -Moléstias de veiculação hídrica -Inundações: Conseqüências mais sérias
Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	-Maiores picos e volumes -Mais erosão -Assoreamento em canais e galerias
Ocupação de várzeas	-Maiores prejuízos -Maiores picos -Maiores custos de utilidades públicas

Infra-estrutura urbana construída de forma desordenada também agrava o problema de inundação em pontos localizados. Como exemplos pode-se citar as pontes e taludes que obstruem o escoamento, as reduções das seções do escoamento por aterros de pontes e para construções em geral, deposições e obstruções de rios, canais e condutos por lixos e sedimentos, projetos e obras de drenagem inadequadas, com diâmetros que diminuem para jusante, drenagem sem esgotamento, entre outros (Tucci, 2003b);(Tucci, 2001).

A ocupação sem planejamento de bacias hidrográficas de jusante para montante gera como conseqüência inundações urbanas em pontos localizados do rio principal por causa da impermeabilização do solo e ocupação das várzeas naturais de inundação. A solução adotada pela maioria das cidades brasileiras para o problema das inundações localizadas é a canalização do rio principal. Essa canalização faz com que os impactos das cheias, que antes ficavam localizados na montante da bacia, sejam transferidos para a jusante. Como geralmente a jusante da bacia já existe ocupação próxima as margens dos rios, a única solução é o aprofundamento da seção do rio a custos altíssimos para a sociedade (Tucci *et al.*, 2003).

3.1.2 – Impacto ambiental sobre o meio aquático

Alguns dos principais problemas introduzidos pelo homem na bacia hidrográfica são (Tucci, 2003a);(Tucci, 2001):

- aumento da temperatura: As superfícies impermeáveis absorvem energia solar e a devolvem ao ambiente, aumentando sua temperatura, principalmente nos grandes centros urbanos, onde predomina concreto e asfalto, criando ilhas de calor. O aumento da temperatura cria condições de movimentação de ar ascendente, aumentando a precipitação. Tucci e Genz (1995) e Agra (2001) comentam que com o aumento da temperatura, a perda por evaporação das superfícies pode ser alta, devido ao calor armazenado em asfaltos, telhados e outros pavimentos, mas devido ao escoamento rápido, a tendência é que ocorra redução da evapotranspiração;
- aumento de sedimentos e material sólido: Durante o desenvolvimento urbano, há o aumento de sedimentos produzidos pela bacia hidrográfica. A urbanização tem causado aumento na produção de sedimentos da ordem de 100 a 500 vezes mais que as áreas rurais (Viessman e Lewis, 2003). As principais conseqüências ambientais são:
 1. Assoreamento das seções de drenagem, com redução da capacidade de escoamento de condutos, rios e lagos urbanos;
 2. Transporte de poluentes agregado ao sedimento, que contaminam as águas pluviais.
- alteração da qualidade das águas pluviais: A urbanização provoca uma deterioração importante das águas de escoamento pluvial, em decorrência do acúmulo de poluentes sobre as superfícies urbanas e gases poluentes na atmosfera. Os poluentes da água pluvial são encontrados no início da precipitação, geralmente nos primeiros 25 mm (Schueller, 1987 *apud* Tucci, 2002). Os principais poluentes encontrados no escoamento superficial urbano são: sedimentos, nutrientes, substâncias que consomem oxigênio, metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, bactérias e vírus patogênicos. A Tabela 3.2 mostra os principais parâmetros de caracterização das águas pluviais relacionados ao tipo de poluição existente e aos prováveis impactos no meio ambiente. A qualidade da água pluvial depende de vários fatores: da limpeza urbana e sua freqüência, da intensidade e distribuição temporal e espacial da precipitação, da época do ano e do tipo de uso da área urbana;

Tabela 3.2 – Parâmetros de caracterização das águas pluviais (Chebbo, 1992 e Gautier, 1998 *apud* Souza, 2002)

Tipo de poluição	Parâmetros	Efeitos sobre o meio (solo, freático), as obras, os outros poluentes ou os usos
Poluição sólida	Material em suspensão	-colmatção mecânica das obras -vetor de outras formas de poluição (metais pesados, matéria orgânica)
Poluição orgânica	DBO ₅ DQO Carbono orgânico total	-moléculas orgânicas naturais = vetores de poluição metálica. Sua biodegradação desencadeia o desprendimento de metais fixados -aporte de matéria biodegradável aumenta a proliferação de bactérias, que aumenta a colmatção
Poluentes nitrogenados e fosforados	NTK Nitratos NO ₃ Nitritos NO ₂ NH ₄ , NH ₃ Fósforo total	-perturba a produção de água potável -colmatção de obras por proliferação de algas
Poluição tóxica	Pb Zn Cu Cd Cr Hg	-toxicidade segundo o metal, forma e concentração -adsorção pelas partículas do solo, microorganismos, material em suspensão ≥ risco de desprendimento e de contaminação do freático em função de modificações das condições biológicas e físico-químicas do meio
	Fenóis	-gosto ruim
	Hidrocarbonetos totais	-toxicidade remanescente segundo a forma das moléculas (as cadeias curtas são mais biodegradáveis) -diminuição da biodegradação -influencia as trocas gasosas na interface água-ar
	HAP (6 substâncias) (benzo[3,4]pyrène) Pesticidas: organo-clorados organo-fosforados organo-metálicos	-muito tóxicos -toxicidade aguda, apresentando riscos de acumulação na cadeia trófica em função de sua grande estabilidade
Poluição microbiológica	Coliformes totais Coliformes fecais Streptococos fecais	-necessidade de esterilização para água potável -vetor de poluição metálica por adsorção aumenta o risco de desprendimento dos metais, no caso de morte dos microorganismos -colmatção por proliferação de microorganismos

- contaminação de aquíferos: As principais condições de contaminação de aquíferos urbanos são devido ao seguinte:
 1. Aterros sanitários podem contaminar as águas subterrâneas pelo processo natural de precipitação e infiltração. Deve-se evitar que sejam construídos aterros sanitários em áreas de recarga e procurar escolher as áreas com baixa permeabilidade. Os efeitos da contaminação nas águas subterrâneas devem ser examinados quando da escolha do local do aterro;

2. Grande parte das cidades brasileiras utiliza fossas sépticas como destino final do esgoto. Existindo muitas fossas sépticas em áreas urbanas próximas umas das outras e que sejam mal executadas, existe risco de contaminação da parte superior do aquífero;
3. A rede de condutos pluviais pode contaminar o solo através de perdas de volume no seu transporte, e até por entupimento de trechos de rede, que pressionam a água contaminada para fora dos sistemas de condutos.

3.2. SISTEMAS SUSTENTÁVEIS DE DRENAGEM URBANA

Até pouco tempo nos países desenvolvidos existia apenas o sistema tradicional de drenagem urbana, que é composto pelos sistemas de micro-drenagem e macro-drenagem. O sistema tradicional tem como princípio a rápida retirada de água, despejando as mesmas distantes do meio urbano, mas esse sistema se mostrou insustentável. Souza (2002) diz que a insustentabilidade se dá devida à impermeabilização de áreas cada vez maiores, o que faz com que todo o sistema de drenagem tenha que ser revisto. Isso gera custos financeiros enormes para a sociedade, além de não se ter uma solução definitiva.

Então, a partir de 1970, começaram a surgir nos países desenvolvidos os primeiros conceitos de sustentabilidade da drenagem urbana. Os princípios modernos que definem a drenagem urbana sustentável (Parkinson *et al.*, 2003);(Tucci e Genz, 1995) são:

- novos loteamentos não podem aumentar a vazão de pico das condições naturais (ou prévias) – controle da vazão de saída;
- o planejamento da bacia deve incluir controle de volume;
- deve-se evitar a transferência de impactos para jusante;
- deve-se ter a bacia como sistema, onde o controle deve ser exercido na bacia hidrográfica como um todo e não em pontos isolados;
- avaliação de cenários futuros, sendo o controle feito tomando-se por base os cenários futuros de ocupação e desenvolvimento da bacia, com base no Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano;
- a existência de um Plano Diretor de Drenagem Urbana que contemple o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano, as legislações municipais e estaduais;
- controle permanente;

- educação ambiental.

Esse conceito sustentável de drenagem urbana, que já está se tornando uma prática corrente nos países desenvolvidos, ainda não é aplicado nos países em desenvolvimento. Souza (2002) menciona que os países pobres ainda seguem o conceito tradicional de drenagem urbana devido à falta de pesquisa aplicada aliada ao conservadorismo do setor. Os países pobres pagam caro por soluções na drenagem que acabam aumentando as inundações, sendo isso uma incoerência, já que os mesmos não têm dinheiro suficiente para investir em infra-estrutura.

As ações sustentáveis de drenagem urbana incluem as ações estruturais, que consistem dos componentes físicos ou de engenharia como parte integrante da infra-estrutura, e as não-estruturais, que incluem todas as formas de atividades que envolvem as práticas de gerenciamento e mudanças de comportamento (Parkinson *et al.*, 2003). A Tabela 3.3 apresenta as principais medidas estruturais e não-estruturais para controle de inundação.

Tabela 3.3 – Medidas de controle das inundações (Ramos *et al.*, 1999)

Medidas estruturais			
Aumento da capacidade de escoamento das calhas	-Diques marginais ou anulares -Melhoria das calhas (aumento da seção transversal, desobstruções e retificações) -Canalização (melhoria da calha e revestimento, substituição da calha por galeria/canal, canal ou desvio)		
Redução das vazões de cheias	Reservatórios nos cursos d'água principais		
	Medidas para controle do escoamento superficial direto	Medidas para detenção das águas pluviais	-Medidas locais (armazenamento em telhados, cisternas, bacias de detenção em parques, etc.) -Medidas fora do local (armazenamento em leitos secos ou em reservatórios implantados em pequenos cursos d'água)
		Medidas para infiltração das águas pluviais	-Medidas locais (poços, trincheiras, bacias de infiltração, escoamento dirigido para terrenos gramados, etc.)
Medidas não estruturais			
-Regulamentação do uso e ocupação do solo (principalmente em fundo de vale) -Proteção contra inundações (medidas de proteção individual das edificações em áreas de risco) -Seguro contra inundações -Sistemas de alerta, ações de defesa civil, relocações			

De acordo com Tucci (2003a), as medidas de controle estruturais podem ser classificadas, por meio de sua ação na bacia hidrográfica, em:

- distribuídas ou na fonte: medidas que atuam sobre o lote, praças e passeios, aumentando áreas de infiltração e percolação, e/ou medidas de armazenamento temporário de água da chuva em reservatórios residenciais ou de telhados;
- na microdrenagem: controle que age sobre um ou mais loteamentos. Utilizam-se para este fim dispositivos de amortecimento do volume gerado pelo(s) loteamento(s), como tanques, lagos e pequenos reservatórios abertos ou subterrâneos;
- na macrodrenagem: esse tipo de controle utiliza medidas estruturais pra modificar rios e riachos urbanos.

O conceito sustentável de drenagem sugere o controle na fonte, a fim de minimizar o impacto para os sistemas de microdrenagem e macrodrenagem. As principais medidas de controle na fonte são (Tassi, 2002) (Tucci, 2003a):

- aumento das áreas de infiltração e percolação;
- armazenamento temporário em reservatórios residenciais.

As principais características do controle local do escoamento são (Urbonas e Stahre, 1993):

- proporcionar grande flexibilidade na escolha dos locais para instalação;
- padronizar projeto de armazenagem unitário;
- reforçar a eficiência do já existente sistema de condução a jusante;
- aumentar a capacidade do sistema por meio do controle do escoamento no tempo real;
- dificuldade em projetar, instalar e manter um grande número de unidades de armazenamento;
- altos custos de operação e manutenção devido ao grande número de unidades de armazenamento.

Dentre os dispositivos de controle na fonte, têm-se os dispositivos de infiltração e percolação, que são estruturas que objetivam devolver à bacia a capacidade de infiltração e percolação, perdidas com a impermeabilização. Estes dispositivos atuam tanto na redução das vazões máximas quanto na dos volumes escoados. As vantagens dos dispositivos que permitem maior infiltração e percolação são (Urbonas e Stahre, 1993):

- recarga do aquífero;

- redução da ocupação da superfície em áreas com lençol freático baixo;
- preservação e/ou aumento da vegetação natural;
- redução dos picos de escoamento a jusante;
- redução do escoamento de base em sistemas de tubos combinados;
- utilização de tubos menores para água pluvial a custos inferiores.

As desvantagens dos dispositivos que permitem maior infiltração e percolação são (Urbonas e Stahre, 1993);(Fujita, 1997):

- a maioria do escoamento ocorre em ruas e grandes áreas comerciais, e uma disposição local em lotes residenciais poderia ter pouco impacto no escoamento;
- o solo pode impermeabilizar com o tempo, levando características próprias a um sistema de disposição falho;
- grande número de instalações de infiltração e percolação não pode receber manutenção apropriada;
- a confiança nessas estruturas pode levar as comunidades a ter enormes gastos de capital no futuro, se ou quando esses sistemas vierem a falhar;
- o nível do aquífero pode subir e aumentar o escoamento de base, que pode causar danos nas fundações das construções;
- dificuldade de avaliar os efeitos positivos devido à complexidade do solo;
- dificuldade de cooperação popular;
- possibilidade de contaminação da água subterrânea.

Os dispositivos alternativos em geral, e os de infiltração em particular, desempenham importante papel no que se refere à qualidade da água no meio urbano. As bacias de infiltração, por exemplo, permitem a filtragem dos poluentes através da percolação da água pelo solo. Deve-se reconhecer que a água do escoamento pluvial tem um elevado grau de poluição, dentre os quais podemos citar os metais pesados, óleos e graxas e materiais em suspensão. Apesar dos dispositivos de infiltração terem a vantagem da filtragem para controlar os poluentes, tem a desvantagem de poder apresentar risco de contaminação do solo e do lençol freático (Souza, 2002). Os principais dispositivos de infiltração e percolação são os planos de infiltração, os valos de infiltração, as bacias de infiltração, as bacias de percolação, os dispositivos hidráulicos permeáveis, e os pavimentos permeáveis.

Os planos de infiltração são, geralmente, áreas rebaixadas, revestidas com gramados laterais, que recebem a precipitação de áreas impermeáveis. Caso ocorram precipitações muito intensas, em que a capacidade de infiltração do solo seja menor que a chuva, a área pode ficar submersa. Se a chuva por acaso carrear material muito fino, isto pode comprometer a capacidade de infiltração, necessitando de limpeza do plano para manter a capacidade de funcionamento (Tucci, 2003a). Os planos promovem uma redução marginal de poluentes, que requer que estruturas sustentáveis de drenagem urbana sejam construídas a jusante desses planos (Urban Drainage and Flood Control District, 2002). A Figura 3.4 mostra o detalhe desta estrutura.

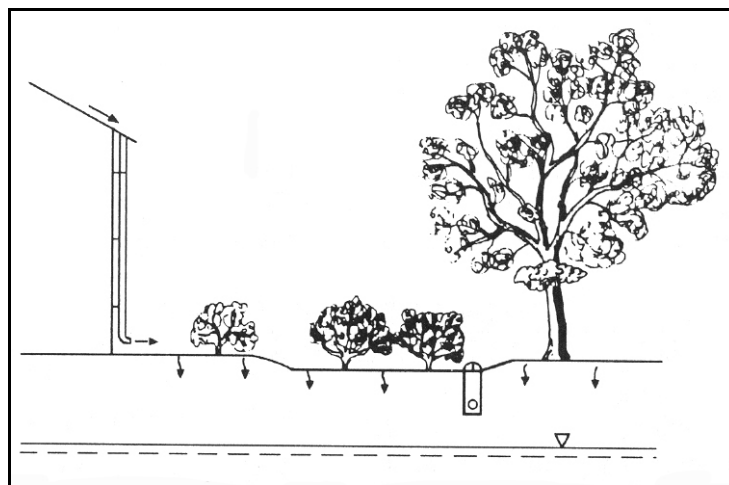


Figura 3.4 – Plano de infiltração (Milograna, 2001)

Os valos de infiltração são dispositivos de drenagem lateral, sendo paralelos às ruas, estradas, estacionamentos e conjuntos habitacionais. Esses dispositivos constituem um sistema de condução, formado por depressões lineares, gramados ou com solo nu, funcionando como um canal, promovendo a desaceleração do escoamento e possibilitando a infiltração parcial da água do escoamento superficial (Schueler *et al.*, 1992 *apud* Agra, 2001). A taxa de infiltração e a capacidade de infiltração dependem do nível da água subterrânea abaixo do valo, a porosidade do solo, a carga de sólidos suspensos na água da chuva e a densidade de vegetação na superfície (Urbonas e Stahre, 1993). O excesso de escoamento superficial, que não é infiltrado, deve ser destinado à rede pluvial (Suderhsa, 2000 *apud* Agra, 2001). A Figura 3.5 apresenta o detalhe do valo de infiltração.

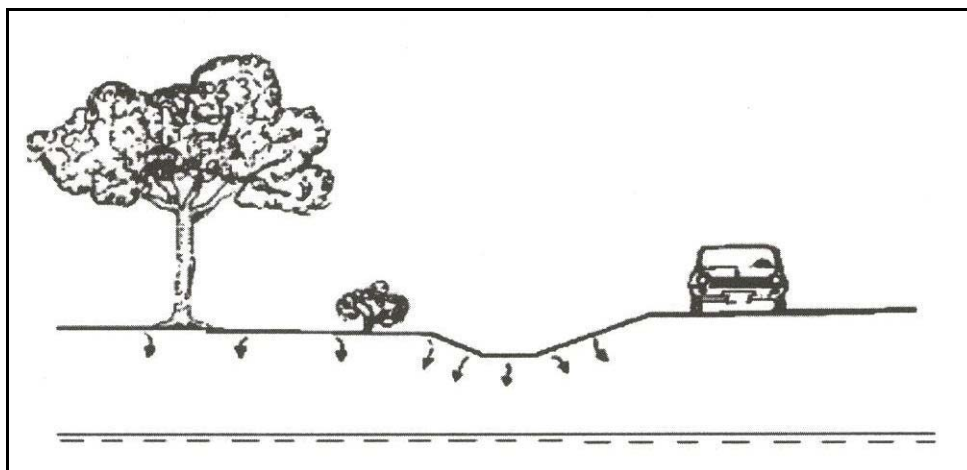


Figura 3.5 – Valo de infiltração (Milograna, 2001)

As bacias de infiltração são estruturas usadas para controle de quantidade e qualidade da água. Água superficial em grande quantidade pode fazer com que haja acúmulo na bacia por longos períodos. O crescimento da vegetação é pouco provável nessa estrutura, tendo como resultado a rápida colmatação das superfícies de infiltração da bacia (Urbonas e Stahre, 1993). A entrada da água da chuva na bacia de infiltração deve permitir eficiente dissipação de energia (Guo, 2001). Para solos com baixa capacidade de infiltração (8 mm/h), é recomendado que a bacia de infiltração seja bem rasa (ASCE, 1992) a fim de evitar problemas com mau cheiro e proliferação de mosquitos. Urbonas e Stahre (1993) recomendam atenção à questão da distância entre o fundo da bacia de infiltração e o nível do lençol freático para que o sistema não perca sua eficiência. Esta distância não deve ser inferior a 1,25m. Guo (2001) recomenda a instalação de uma camada de areia e uma trincheira de infiltração na base da bacia de infiltração para aumentar a infiltração. Urbonas e Stahre (1993) lembram que essas estruturas não são bem aceitas pela comunidade. A Figura 3.6 tem o detalhe do dispositivo.

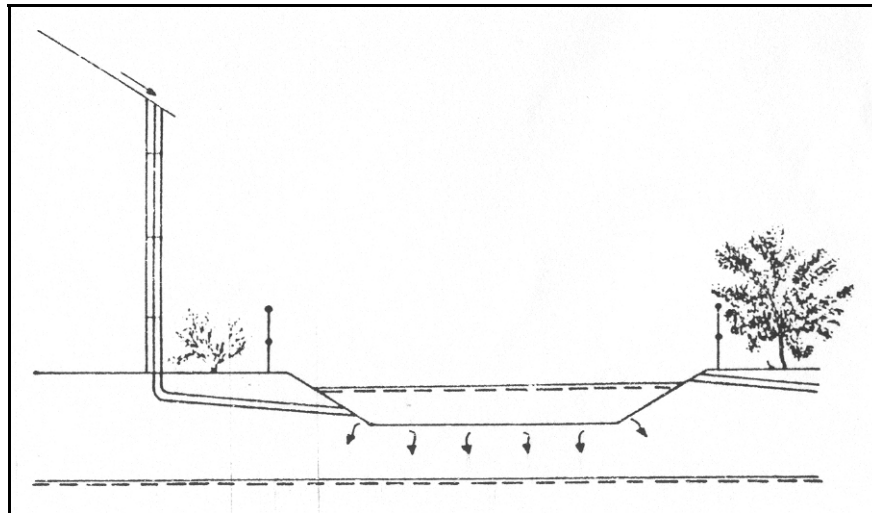


Figura 3.6 – Bacia de infiltração (Milograna, 2001)

As bacias de percolação são estruturas que recebem água de telhados e pequenas áreas pavimentadas, armazenando essa água temporariamente em um reservatório de pedras para lentamente fazer a percolação no solo. Tucci e Genz (1995) recomendam que a bacia de percolação seja instalada para áreas em que o lençol freático esteja distante 1,25 m do fundo da bacia. Para solos com baixa permeabilidade (8 mm/h), deve ser instalado um tubo drenante no fundo da bacia conectado a um sistema de condução. A água de chuva pode trazer material fino que causa a colmatação da bacia de percolação sendo, portanto recomendado a manutenção de tempos em tempos. Para minimizar o problema pode-se instalar um filtro de material geotêxtil envolvendo toda a estrutura (Urbonas e Stahre, 1993). A Figura 3.7 ilustra uma bacia de percolação.

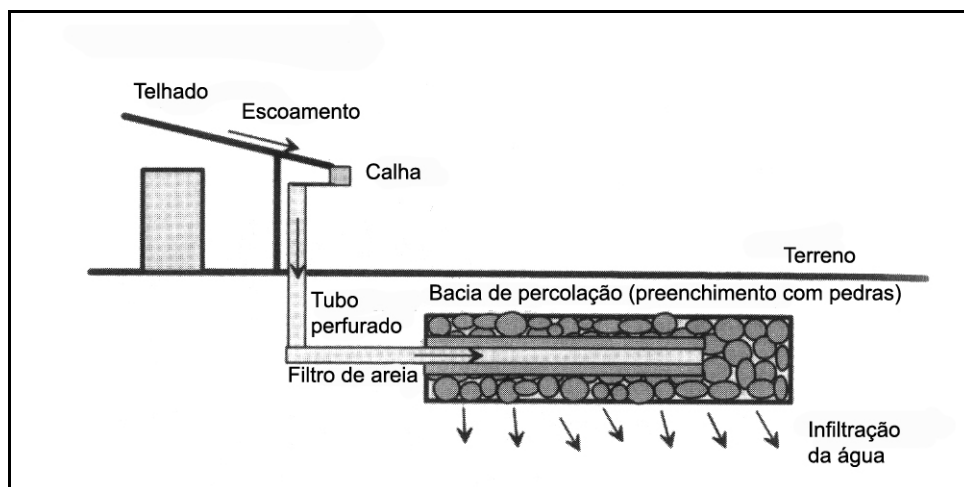


Figura 3.7 – Bacia de percolação (Guo, 2001)

Os dispositivos hidráulicos permeáveis recebem o escoamento superficial de áreas impermeáveis, conduzindo-os para o lençol freático através da infiltração e percolação. As entradas permeáveis na rede de drenagem, as trincheiras ou valas permeáveis e o meio fio permeável são alguns destes dispositivos hidráulicos (Tucci e Genz, 1995) (Tucci, 2003a). Destes dispositivos, a trincheira de infiltração é a estrutura mais conhecida. A trincheira de infiltração é um caso especial da bacia de percolação, onde também se recomenda que a taxa mínima de infiltração do solo seja de 8 mm/h (Urbonas e Stahre, 1993). A Figura 3.8, que é o caso das entradas permeáveis na rede de drenagem, mostra o detalhe do filtro na parte superior da caixa para evitar o entupimento. A Figura 3.9 mostra uma trincheira de infiltração e a Figura 3.10 o meio-fio permeável.

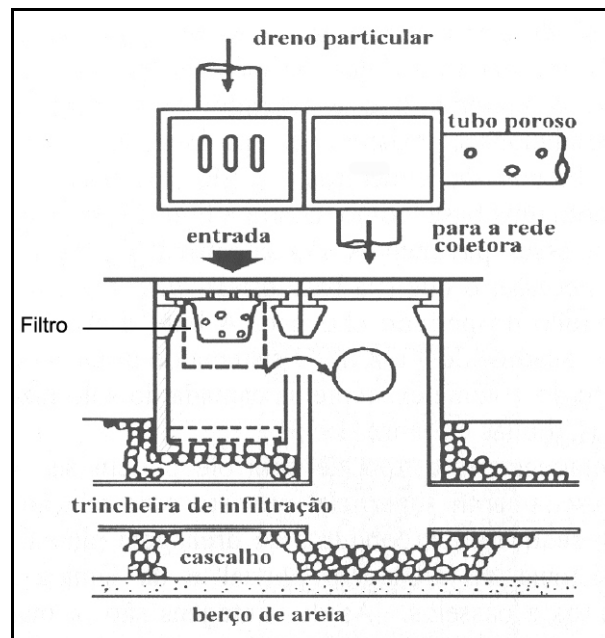


Figura 3.8 – Entradas permeáveis de drenagem (Fujita, 1984 *apud* Tucci, 2003a)

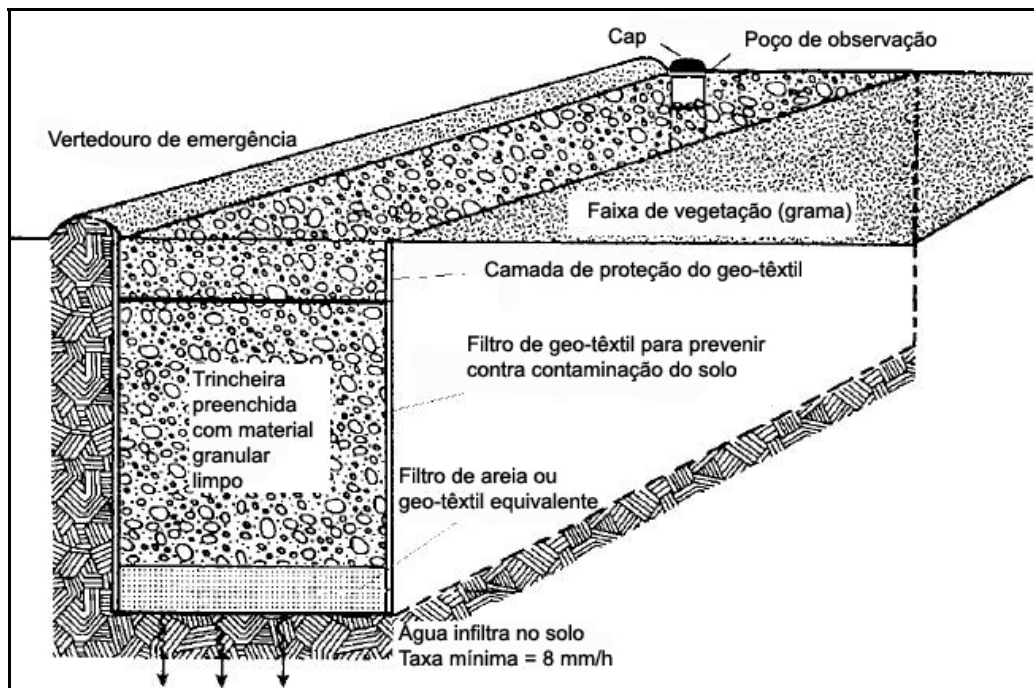


Figura 3.9 – Trincheira de infiltração (Schueler, 1987 *apud* Cruz *et al.*, 1999)

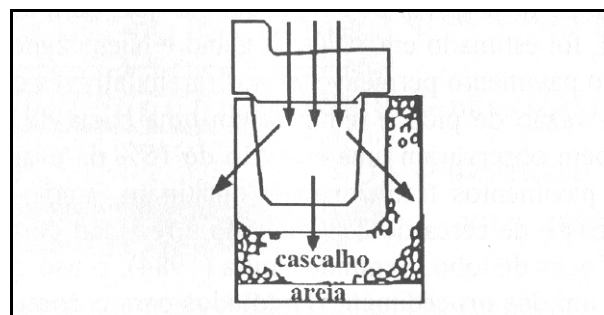


Figura 3.10 – Meio fio permeável (Fujita, 1984 *apud* Tucci, 2003a)

O pavimento permeável é uma estrutura de controle de escoamento superficial utilizada principalmente em passeios públicos, áreas de estacionamento e ruas de pouco tráfego. Os pavimentos permeáveis têm a vantagem de poderem ser utilizados em áreas com alta taxa de urbanização, além de terem a boa capacidade de se adequar esteticamente ao ambiente. Tucci e Genz (1995) ainda citam como vantagem a redução dos condutos da drenagem pluvial, redução de custos do sistema de drenagem pluvial e redução da lâmina de água de estacionamentos e passeios. Como desvantagem pode-se citar a tendência a colmatagem depois de certo tempo de uso, a necessidade de manutenção periódica e apresentar um custo maior que os pavimentos tradicionais. Deve-se também ter precaução com águas fortemente contaminadas em regiões de lençóis freáticos próximos a superfície, pois o

impacto nas águas do aquífero pode ser grande. Os pavimentos permeáveis se caracterizam por terem uma base que além de permitir a infiltração da água no solo, ainda tem um reservatório de pedras que armazena temporariamente a água de chuva. Urbonas e Stahre (1993) e Cruz *et al.* (1999) descrevem basicamente três tipos de pavimentos permeáveis: o pavimento de asfalto poroso, o pavimento de concreto poroso e o pavimento de blocos de concreto vazados preenchidos com material granular, como areia e vegetação rasteira, como grama. Deve-se tomar cuidado com tráfego pesado sobre os pavimentos de blocos de concreto vazados preenchidos com material granular, pois alguns blocos podem afundar e se alinhar de forma errada (Urbonas e Stahre, 1993). A Figura 3.11 apresenta o detalhe da estrutura.

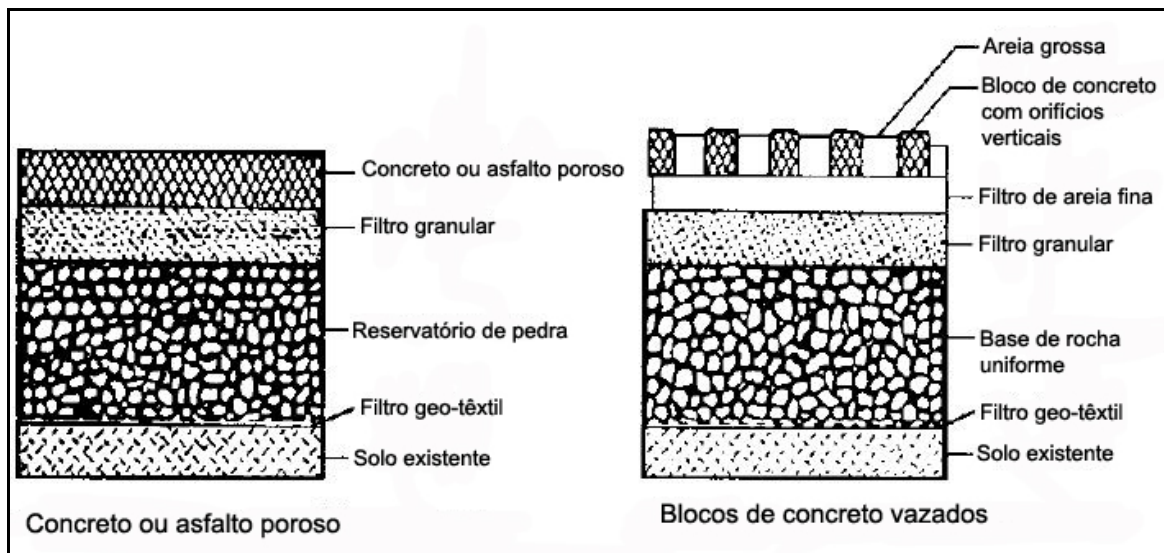


Figura 3.11 – Pavimento permeável (Urbonas e Stahre, 1993) (Cruz *et al.*, 1999)

Alguns trabalhos sobre pavimentos permeáveis podem ser citados. Araújo (1999) fez ensaios de simulação de chuva em cinco superfícies: uma de solo compactado de declividade variando de 1 a 3%; uma de paralelepípedos com 4 % de declividade; uma de blocos de concreto (blockets) com 2% de declividade; uma de concreto impermeável de 4% de declividade; uma de blocos de concreto vazados com 2% de declividade; e uma de concreto poroso com 2 % de declividade. Com intensidade de 110 mm/h, equivalente a 5 anos de tempo de retorno, e 10 minutos de duração, obteve o coeficiente de escoamento para cada pavimento. Os pavimentos de blocos vazados e o concreto poroso foram os mais eficientes, com coeficientes de escoamento de 0,03 e 0,005, respectivamente. Deve-se

ressaltar que os experimentos foram realizados em áreas de 1 m² sem contribuição, onde os efeitos de armazenamento na superfície e no reservatório tem mais efeito. Além disso, a taxa final de infiltração corresponde a taxa final de infiltração do experimento e não a taxa final de infiltração da superfície, que ocorrerá somente quando o solo estiver saturado. Os resultados obtidos por Genz (1994) indicaram maiores coeficientes de escoamento para o chão batido, o paralelepípedo e para os blocos de concreto (blockets).

Pagotto *et al.* (2000) fizeram um estudo comparando o comportamento hidráulico de um pavimento convencional com um poroso. Eles concluíram que o asfalto poroso permite um esvaziamento gradual para a saída (os picos de vazões foram limitados e os tempos de descarga foram longos). As poças de água também são reduzidas, assim como a dispersão da água pelo vento e a evaporação. Hunt *et al.* (2002) pesquisaram dois pavimentos permeáveis na área leste do Estado da Carolina do Norte, Estados Unidos, para a verificação da redução do escoamento superficial. O primeiro tipo de pavimento era formado por blocos com aproximadamente 40% de espaços vazios preenchidos com camadas de areia e calcário argiloso lavado. O segundo tipo é um pavimento de concreto poroso de 150 mm de espessura. O primeiro tipo foi testado de 1999 a 2001 e resultou em coeficientes de escoamento de 0,20 a 0,50. Para a estimativa dos coeficientes de escoamento foram utilizados dois métodos. O primeiro é bem simples e consistiu em adotar o mesmo peso para precipitações de intensidades diferentes. O segundo método adotou pesos maiores para as precipitações de maiores intensidades. Por isso os valores do coeficiente de escoamento foram dependentes do método utilizado e a intensidade da chuva. O segundo tipo de pavimento ainda se encontra em fase de monitoramento.

Brattebo e Booth (2003) avaliaram quatro pavimentos permeáveis comerciais durante seis anos. O primeiro era de um sistema em grelha de plástico flexível, virtualmente sem áreas impermeáveis, preenchido com areia e plantado com grama. O segundo era equivalente ao primeiro, só que preenchido com brita. O terceiro tipo era uma treliça de blocos de concreto com 60% de área impermeável, preenchido com solo e plantado com grama. O quarto e último tipo eram pequenos blocos de concreto com 90% da área impermeável, onde os espaços vazios entre os blocos eram preenchidos com brita. Nesses quatro pavimentos não foi observado escoamento superficial. Deve-se ressaltar que as precipitações tiveram intensidade baixa, sendo a maior de 7,4 mm/h.

Alguns trabalhos sobre pavimentos permeáveis relatam também o problema da colmatação. Wilson (2002) *apud* James e von Langsdorff (2003) fez um estudo no qual aplicava terra e lama entre as células do pavimento permeável e verificava o decréscimo da capacidade de infiltração do pavimento. Ele concluiu que a quantidade de sedimento que pode ser aplicado sem causar a perda de eficiência no pavimento depende da porosidade do material de enchimento das células drenantes do pavimento. Para um material com 34% de porosidade, depois da aplicação de $1,4 \text{ kg/m}^2$, a taxa média de infiltração na superfície do pavimento pode cair para um valor abaixo das intensidades de precipitação. Para um valor maior ou igual a $3,9 \text{ kg/m}^2$, o pavimento tornou-se totalmente colmatado. Davies *et al.* (2002) fizeram um estudo com superfícies de pavimentos permeáveis com declividades de 1, 3, 5 e 10%. Nesses pavimentos foram aplicados dois tipos de siltes. O primeiro era manufaturado, baseado em pesquisas realizadas anteriormente. O segundo foi coletado em superfícies urbanas. Foram utilizados três métodos de aplicação do silte. Os resultados mostraram diferenças muito claras nos valores de infiltração entre o silte manufaturado e o das superfícies urbanas, e os pavimentos que não receberam silte mantiveram as suas características de infiltração inalteradas. Comprovou-se também que a limpeza mecânica nos pavimentos incrementou bastante a taxa de infiltração. Dierkes *et al.* (2002) fizeram um estudo para mostrar o efeito da capacidade de infiltração antes e depois da limpeza do pavimento permeável. O pavimento foi construído em 1996 e tinha uma área de 1500 m^2 . Ele foi construído com uma superfície de concreto poroso com uma camada filtrante. Para a limpeza foi usada uma máquina de sucção a vácuo. Antes os pavimentos tinham uma taxa de infiltração inferior a 1 L/(s.ha) , mostrando que eles estavam totalmente colmatados. Com a limpeza, eles passaram a ter uma taxa superior a 1500 L/(s.ha) , comprovando a importância da manutenção regular dos pavimentos permeáveis. Gerrits e James (2002) fizeram um estudo em dois pavimentos permeáveis em um estacionamento na Universidade de Guelph, Canadá. Nesses estudos preliminares foi verificado o decréscimo da capacidade de infiltração com o aumento do número diário do tráfego de carros, assim como da quantidade de matéria orgânica e de material fino. Foi verificado que a capacidade de infiltração é aumentada pela remoção superficial de 10 a 20 mm de material fino que preenche os vazios dos pavimentos permeáveis.

As superfícies permeáveis diferenciam-se dos pavimentos permeáveis pela ausência dos reservatórios de pedra. A capacidade de infiltração das superfícies permeáveis tende a ser menor do que os pavimentos permeáveis, e elas são dependentes da boa condição para

infiltração do solo local. Jacobsen e Harremoës (1981) apud Araújo (1999) fizeram um trabalho com superfícies semipermeáveis em que monitoraram uma área de 682 m² de declividade 1,4%. A cobertura era formada por pedras de granito assentadas sobre areia, numa combinação de 72% de pedras de granito e 28% de areia. Durante cinco meses de monitoramento os dados foram comparados com uma superfície impermeável do local. O coeficiente de escoamento para a superfície impermeável foi de 0,80 a 0,90; 0,10 para a superfície semipermeável e 0,01 para a superfície permeável. Campana e Eid (2003) fizeram um estudo para comparar a eficiência de infiltração de três superfícies, de áreas de 3200 a 4500 m². Essas superfícies foram monitoradas de outubro de 2001 a março de 2003 para as condições naturais de funcionamento. As superfícies simuladas foram: asfalto, tomado como situação impermeável; blocos vazados e superfície de chão batido coberto com pedriscos. Os resultados mostraram a eficiência da superfície formada por blocos vazados, desde que sejam tomados cuidados nos preenchimentos dos espaços vazios dos blocos. A superfície coberta por pedriscos mostrou-se eficiente inicialmente, mas devido ao efeito da compactação do substrato perdeu sua eficiência. Silva e Campana (2004) realizaram ensaios preliminares em superfícies de grama e blocos vazados. As parcelas tinham dimensões de 1,95 m de comprimento por 1 m, com declividade de 4%. Em um evento de 07/02/2004 de precipitação média de 0,26 mm/min, o coeficiente de escoamento para o bloco vazado foi de 0,01 e para a grama foi de 0,003. Isto indica uma enorme eficiência dessas superfícies para o controle de escoamento superficial. Deve-se ressaltar que nesses experimentos as superfícies não sofreram efeitos de compactação e colmatção.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo descreve como ocorrem os processos de escoamento superficial e infiltração em superfícies planas, além dos termos a eles associados. No estudo de caso, para a propagação do escoamento no estacionamento, na sarjeta e nas galerias de águas pluviais foi utilizado o modelo da onda cinemática. Para o reservatório de retenção foi utilizado o método de Pulz para a propagação, além de equações para o descarregador de fundo do reservatório e vertedor livre. Um breve comentário sobre esses métodos e equações é apresentado nesse capítulo.

4.1. ESCOAMENTO SUPERFICIAL E INFILTRAÇÃO

Quando se aplica uma precipitação de intensidade constante e suficientemente longa sobre uma área fixa, tem-se como resultado um hidrograma de escoamento superficial. A curva da taxa de infiltração pode ser obtida através da diferença entre a intensidade de precipitação e o hidrograma de escoamento superficial. A Figura 4.1 mostra esse processo, que tem sido utilizado para testar a eficiência de superfícies no controle do escoamento superficial.

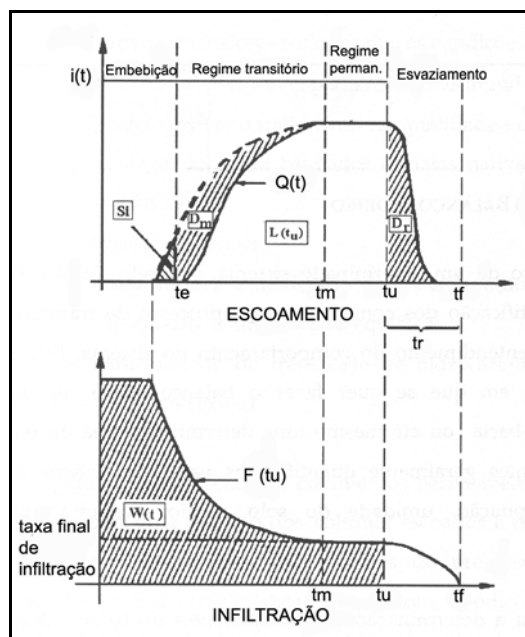


Figura 4.1 – Hidrograma e curva da taxa de infiltração resultantes de uma chuva constante (Bouvier, 1990 *apud* Genz, 1994)

Os principais termos da Figura 4.1 são (Araújo, 1999):

- a intensidade de chuva $i(t)$ no tempo t_u (duração da precipitação);
- hidrograma de escoamento superficial $Q(t)$;
- curva da taxa real de infiltração $F(t)$;
- lâmina total escoada $L(t)$;
- lâmina total infiltrada $W(t)$;
- lâmina total armazenada na superfície $S(t)$. Esta pode ser considerada como a soma do escoamento de água retido nas depressões da superfície $S_i(t)$, e a altura média da lâmina de escoamento em movimento na superfície da parcela $D_m(t)$;

As quatro fases mostradas na Figura 4.1 são (Bouvier, 1990 *apud* Genz, 1994):

1. Fase de embebição: No início da precipitação o escoamento é nulo até uma duração t_e (tempo de embebição). Até esse tempo, as perdas são iguais ao volume de chuva e são constituídas do preenchimento das depressões naturais do solo e do volume infiltrado;
2. Regime transitório: Essa fase se desenvolve até o tempo t_m (tempo de entrada do regime permanente). Nela os valores da intensidade do escoamento $Q(t)$ são resultantes da superposição de três fenômenos: diminuição contínua da intensidade de infiltração $F(t)$; aumento da altura média da lâmina de água em movimento na superfície da parcela $D_m(t)$; e aumento do armazenamento nas poças $S_i(t)$;
3. Regime permanente: No instante t_m que marca o fim do regime transitório, o escoamento se estabiliza em um valor constante Q_x . O sistema está em equilíbrio, e as perdas são devido somente à infiltração de base;
4. Esvaziamento: Esta fase corresponde ao esvaziamento da detenção móvel da superfície D_m depois do t_u (duração da chuva). A duração da fase t_f corresponde ao tempo ocorrido entre t_u (duração da chuva) e o t_f (fim do escoamento da superfície). D_f é a detenção superficial recuperável do escoamento.

Conhecendo-se o hidrograma visto na Figura 4.1, a intensidade e duração da precipitação, pode-se determinar o volume escoado e o precipitado. A razão entre o volume escoado e o precipitado é chamado de coeficiente de escoamento (C), que varia de 0 a 1. O coeficiente engloba efeitos de infiltração, armazenamento por detenção, evaporação, retenção e interceptação, efeitos esses que afetam a distribuição cronológica e a magnitude do pico de

deflúvio superficial direto (CETESB, 1980). O coeficiente de escoamento é também afetado pela intensidade de precipitação e sua duração (ASCE, 1992), o que faz com que o coeficiente seja maior para precipitações com maiores intensidades. Na Tabela 4.1 estão os valores dos coeficientes de escoamento adotados para a cidade de São Paulo.

Tabela 4.1 – Valores de C adotados pela Prefeitura Municipal de São Paulo (Wilken, 1978)

	ZONAS	Valores de C
1	DE EDIFICAÇÃO MUITO DENSA. Partes centrais, densamente construídas de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas	0,70 a 0,95
2	DE EDIFICAÇÃO NÃO MUITO DENSA. Partes adjacentes ao centro, de menor intensidade habitacional, mas com ruas e calçadas pavimentadas	0,60 a 0,70
3	DE EDIFICAÇÕES COM POUCAS SUPERFÍCIES LIVRES Partes residenciais com construções cerradas, ruas pavimentadas	0,50 a 0,60
4	DE EDIFICAÇÕES COM MUITAS SUPERFÍCIES LIVRES Partes residenciais tipo Cidade-Jardim ruas macadamizadas (pedra britada aglutinada e comprimida) ou pavimentadas	0,25 a 0,50
5	DE SUBÚRBIOS COM ALGUMA EDIFICAÇÃO Partes de subúrbios com pequena densidade de construções	0,10 a 0,25
6	DE MATAS, PARQUES E CAMPOS DE ESPORTES Partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados, campos de esporte sem pavimentação	0,05 a 0,20

Quando se estuda a infiltração, deve-se diferenciar a capacidade de infiltração da taxa de infiltração. A capacidade de infiltração é a quantidade máxima de água que um solo pode absorver, em termos de lâmina por tempo. A taxa de infiltração é a quantidade real de água infiltrada no solo, em lâmina por tempo. A taxa de infiltração pode igualar-se a capacidade de infiltração quando a precipitação for superior a curva da capacidade de infiltração.

Podem ocorrer três casos gerais de infiltração associado com a precipitação: o primeiro, em que a intensidade da precipitação é menor que a condutividade saturada (capacidade final de infiltração) do solo. De acordo com essa condição, mostrada como (4) na Figura 4.2, o escoamento nunca ocorrerá visto que toda a precipitação infiltra na superfície do solo. Entretanto, essa condição deve ser reconhecida no processo de simulação contínua visto que o nível de umidade do solo é afetado mesmo que o escoamento não ocorra; o segundo caso é um em que a taxa de precipitação excede a condutividade saturada, mas é menor que a capacidade de infiltração. As curvas (1), (2) e (3) da Figura 4.2 ilustram essa condição. Deve ser observado que o período do início da precipitação para o tempo da saturação da superfície varia com a intensidade da chuva; o caso final é um em que a

intensidade de precipitação excede a capacidade de infiltração. Essa condição é ilustrada pela curva da capacidade de infiltração da Figura 4.3, e pelas partes das curvas de infiltração (1), (2) e (3) da Figura 4.2, em que há os estágios em declínio. Somente nessas condições o escoamento pode ocorrer (Mein e Larson, 1971 *apud* Viessman e Lewis, 2003)

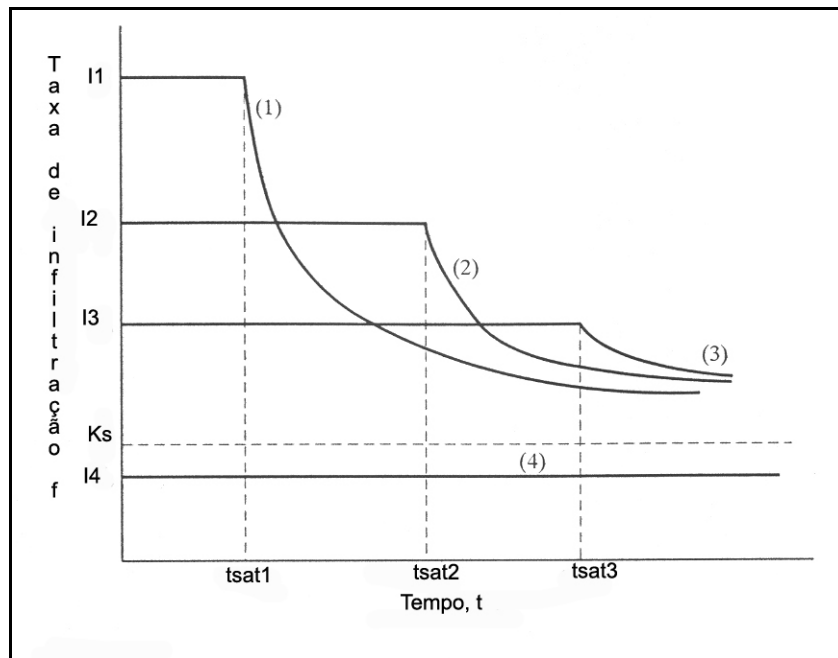


Figura 4.2 – Curvas de infiltração para diferentes intensidades de precipitação (Viessman e Lewis, 2003)

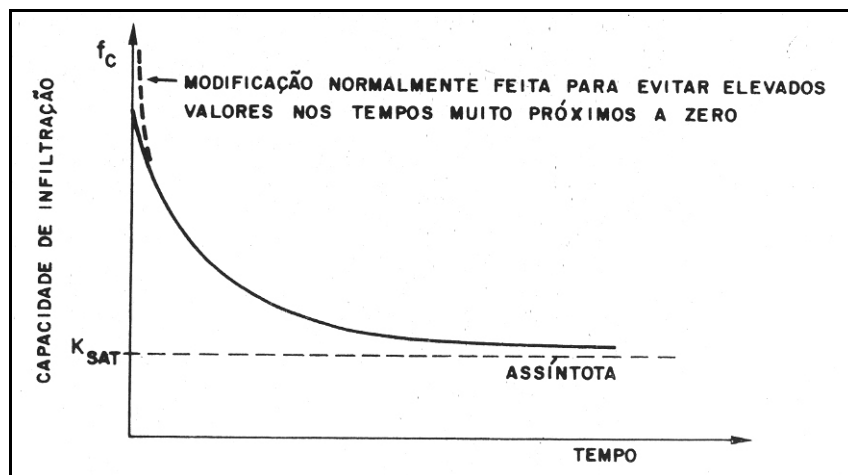


Figura 4.3 – Curva da capacidade de infiltração (Rubim, 1966 *apud* Magalhães, 1989)

Existem modelos que procuram descrever a infiltração através do tempo. Entre os principais modelos existentes, têm-se os de Horton e Philip, que são equações para cálculo

da infiltração pontual. O modelo de Horton apresenta três parâmetros empíricos, que são mostrados na Equação 4.1.

$$I_t = I_c + (I_o - I_c)e^{-Kt} \quad (\text{Equação 4.1})$$

em que: I_t = capacidade de infiltração no tempo t (mm/h);

I_c = capacidade de infiltração final (mm/h);

I_o = capacidade de infiltração inicial (mm/h);

K = constante que representa a taxa de decréscimo na capacidade I_t (L/h);

t = tempo decorrido (h).

O modelo de Horton só pode ser aplicado quando a intensidade de precipitação for maior que a capacidade de infiltração da superfície. Os parâmetros I_c , I_o e K devem ser determinados usando-se dados observados de infiltração (Rawls *et al.*, 1993).

O modelo de Philip é o resultado da resolução analítica da equação de Richards, tendo como resultado a Equação 4.2.

$$I_t = \frac{1}{2}St^{-1/2} + A \quad (\text{Equação 4.2})$$

em que: I_t = infiltração no tempo t (mm/h);

S = parâmetro de absorção do solo (mm/h^{1/2});

A = condutividade hidráulica (mm/h);

t = tempo (h).

A equação de Philip tem embasamento físico e um dos possíveis métodos para se determinar os parâmetros S e A realizam-se ensaios de campo com infiltrômetros (Righetto, 1998).

Para a medição da capacidade de infiltração existem basicamente dois métodos: a análise de hidrogramas e estudo por infiltrômetros. Os infiltrômetros são usualmente classificados como infiltrômetros por aspersão e por inundação. Chuvas artificiais são simuladas sobre um pequeno plano de teste e a infiltração calculada por observação da diferença entre a

precipitação e o escoamento, levando-se em consideração o armazenamento em depressões e a detenção superficial. Infiltrômetros de inundação usualmente são anéis ou tubos cravados verticalmente no terreno. Geralmente são utilizados dois anéis concêntricos para minimizar o efeito da dispersão lateral da água. Um lâmina de 5 cm de água é aplicada inicialmente, medindo-se o rebaixamento dessa lâmina no tempo. Esse ensaio fornece como resultado a curva da capacidade de infiltração do solo. Rawls *et al.* (1993) apresenta maiores explicações sobre os outros dois métodos existentes, que são os infiltrômetros de sulco e de tensão.

Os infiltrômetros de inundação são utilizados para determinar as taxas de infiltração em sistemas de irrigação de superfície ou inundação, bacias de infiltração para recarga subterrânea, infiltração de rios, canais, reservatórios ou lagoas de águas residuárias, movimento de percolação para debaixo da terra de aterros sanitários ou outra disposição de lixo, e efetividade de revestimentos de argilas, compactação do solo, ou outro tratamento para reduzir infiltração ou percolação (Bouwer, 1986).

O ensaio do infiltrômetro de inundação apesar da fácil realização, tem diversas causas de erro (Pinto *et al.*, 1976);(Araújo, 1999):

- ausência do efeito da compactação produzida pela água da chuva;
- restrição do movimento do ar presente no solo que está abaixo da frente de umidade, ocasionando a redução da taxa de infiltração (Bouwer, 1986);
- deformação da estrutura do solo com a cravação dos tubos;
- adoção desse valor de infiltração como representativo da média espacial de uma determinada área.

Infiltrômetros por aspersão são simuladores de chuva. Eles são designados para imitar os aspectos de chuva natural tais como a distribuição do tamanho das gotas, velocidade e impacto das gotas, intensidades, ângulo do impacto. Possibilitam aplicação de gotas de chuvas contínuas e uniformes, e de reproduzir a distribuição e duração da intensidade de precipitação (Rawls *et al.*, 1993).

Peterson e Bubenzer (1986) descrevem basicamente dois grupos de simuladores. O primeiro grupo é o sistema formador de gotas. Essas gotas são formadas nas extremidades

de tubos de vidros de pequeno diâmetro, aço inoxidável, latão ou tubos de polietileno. O segundo grupo são os que utilizam aspersores para formar gotas. Dentre os exemplos podem-se citar os infiltrômetros do tipo F, do tipo FA e do tipo Rocky Mountain.

Alves Sobrinho *et al.* (2002) desenvolveram um infiltrômetro de aspersão portátil de forma que o diâmetro das gotas e a energia cinética produzida com o impacto no solo fossem semelhantes a chuva natural. Esse infiltrômetro de aspersão permite simular uma área de $0,70\text{m}^2$ com a aplicação ininterrupta de água. A uniformidade da chuva, medido pelo coeficiente de uniformidade de Christiansen, ficou entre 82 e 87%. A relação entre a energia cinética da chuva produzida pelo infiltrômetro e a energia cinética da chuva natural situou-se acima de 90% para precipitações de até 100 mm/h. Esse mesmo simulador foi utilizado em um trabalho por Alves Sobrinho *et al.* (2003) para estudar o comportamento da infiltração em diferentes solos cultivados, ajustando as curvas de infiltração obtidas com os modelos teóricos de infiltração de Horton e Kostiakov-Lewis.

Souza (2004) desenvolveu um simulador de chuva para estudos de atributos físicos e químicos do solo relacionados a impactos ambientais. Este simulador é formado por uma armação retangular, apoiada sobre quatro pernas reguláveis para uma altura de 3m da superfície do solo. No centro da armação há um bico aspersor modelo Veejet 80100, que em funcionamento fica oscilando em uma área de 1m de lado. A intensidade de precipitação é conseguida pelo número de oscilações do bico na unidade do tempo. Esse simulador se mostrou eficiente em estudos de infiltração no solo, mas também pode ser utilizado em estudos para formação de crosta, lixiviação de solutos, perdas de solo, perdas de águas e nutrientes por escoamento superficial.

Genz (1994) e Araújo (1999) realizaram estudos em superfícies permeáveis em que foi utilizado um simulador de chuva que tinha a capacidade de gerar precipitações de intensidades variáveis em uma área de 1m^2 de solo. Esse simulador possuía uma torre em forma de tronco de pirâmide de 4m de altura, onde no centro eram localizados os aspersores. A torre era coberta por um tecido resistente para evitar o efeito do vento sobre o jato do aspersor. As precipitações simuladas ficavam na faixa de 30 a 150 mm/h.

Musgrave e Holtan (1964) descrevem que há diferença nos resultados obtidos pelo infiltrômetro de inundação e do infiltrômetro de aspersão. Os de inundação apresentam

taxas finais de infiltração maiores do que os de aspersão, isso devido à ausência de impacto da chuva. Também há o fato de os aspersores umedecerem uma área externa maior que os infiltrômetros de inundação, o que dificulta a ocorrência do fluxo subterrâneo e diminui a infiltração.

4.2. EQUAÇÕES PARA O RESERVATÓRIO

Os reservatórios utilizam os métodos do tipo armazenamento para descrever o escoamento em regime não permanente. Os modelos de armazenamento utilizam a equação da continuidade concentrada e uma relação entre o armazenamento e a vazão de saída e entrada do trecho para a simulação do escoamento. Dentre esses modelos de armazenamento, o método de Pulz é o mais conhecido para a simulação da propagação em reservatórios. A expressão é dada por:

$$\frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} = \frac{(I_t + I_{t+1})}{2} - \frac{(Q_t + Q_{t+1})}{2} \quad (\text{Equação 4.3})$$

em que: S_t e S_{t+1} são os armazenamentos nos tempos t e $t+1$;

I_t e I_{t+1} são as vazões de entrada no reservatório nos tempos t e $t+1$;

Q_t e Q_{t+1} são as vazões de saída do reservatório nos tempos t e $t+1$;

Δt é o intervalo de tempo da simulação.

Os termos desconhecidos dessa equação são S_{t+1} e Q_{t+1} . Reorganizando os termos conhecidos para o lado direito da equação, tem-se:

$$Q_{t+1} + \frac{2S_{t+1}}{\Delta t} = I_t + I_{t+1} - Q_t + \frac{2S_t}{\Delta t} \quad (\text{Equação 4.4})$$

Como se tem dois termos desconhecidos é necessário mais uma equação para a resolução da Equação 4.4. Essa segunda equação relaciona o armazenamento com a vazão de saída do reservatório. Essa relação é expressa através da relação entre duas funções, que são a cota versus o armazenamento e a cota versus a vazão.

A relação entre a cota e o armazenamento é dada através da medição do volume do reservatório em relação a determinadas cotas. Em relação à função da cota versus a vazão, ela está relacionada com as estruturas extravasoras do reservatório, que são o vertedor e o descarregador de fundo.

A equação do vertedor é dada por:

$$Q_v = C_d L (Z - Z_w)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{Equação 4.5})$$

em que: Q_v é a vazão do vertedor (m^3/s);

C_d é o coeficiente de descarga do vertedor (adimensional);

L é a largura do vertedor (m);

Z é a cota de água no reservatório (m);

Z_w é a cota da crista do vertedor (m).

A equação do descarregador de fundo é dada por:

$$Q_d = C_d A_d \sqrt{2gH} \quad (\text{Equação 4.6})$$

em que: C_d é o coeficiente de descarga (adimensional);

A_d é a área do descarregador de fundo (m^2);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2);

H é a diferença de nível entre a montante e a jusante do reservatório (m).

Conhecida a relação cota versus vazão e cota versus armazenamento, se chega à segunda equação, conhecida por $Q = f(S)$. Através dessa função pode-se construir outra função relacionando $Q = f_1(Q + 2S/\Delta t)$, onde o processo de cálculo é:

- a) inicialmente estabelece-se o volume inicial S_0 . Com base nesse valor, determina-se Q_0 ;
- b) para cada intervalo de tempo seguinte deve-se determinar o termo da direita da Equação 4.4;

- c) como o termo da direita da Equação 4.4 foi determinado, o termo $Q_{t+1} + 2S_{t+1}/\Delta t$ é então conhecido. Com o valor desse último termo e utilizando a função $Q = f_1(Q + 2S/\Delta t)$ é determinado o valor de Q_{t+1} ;
- d) com base no valor de Q_{t+1} determina-se $S_{t+1} = f^{-1}(Q_{t+1})$;
- e) os passos de b a d se repetem para cada intervalo de tempo.

4.3. ONDA CINEMÁTICA

As equações hidrodinâmicas descrevem o escoamento não-permanente, que considera as variações no tempo e no espaço da vazão, velocidade e profundidade. São duas as equações hidrodinâmicas, que são a da continuidade (Equação 4.7) e dinâmica ou da quantidade de movimento (Equação 4.8), que juntas formam o conjunto conhecido como equações de Saint-Venant. As equações são:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_s}{\partial t} \pm q = 0 \quad (\text{Equação 4.7})$$

$$\frac{1}{A_s} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A_s} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A_s} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad (\text{Equação 4.8})$$

em que: Q = vazão;

q = vazão suplementar por unidade de comprimento das margens, com o sinal negativo se for influxo (entrada) e positivo se for efluxo (saída);

A_s = área da seção;

y = lâmina de água na posição x e no tempo t ;

g = aceleração da gravidade;

S_o = declividade do plano de escoamento;

S_f = declividade da linha de energia .

Nas equações de Saint-Venant assume-se que (Chow *et al.*, 1988):

- o escoamento é unidimensional; a profundidade e a velocidade variam somente na direção longitudinal do canal ou plano. Isso implica que a velocidade é constante e a superfície é admitida horizontal em qualquer seção perpendicular ao eixo longitudinal;

- para variar gradualmente o fluxo ao longo do canal ou plano prevalecem as pressões hidrostáticas e as acelerações verticais são negligenciadas (Chow, 1959);
- o eixo longitudinal do canal ou plano é aproximado de uma linha reta;
- a declividade do fundo do canal ou plano é pequena e seção do canal ou plano é fixa; isto é, os efeitos de erosão e sedimentação são negligenciáveis;
- o coeficiente de atrito para escoamento permanente uniforme e turbulento é aplicável, então relações tais como a equação de Manning podem ser usadas para descrever os efeitos do atrito;
- o fluido é incompressível e a densidade constante em todo o escoamento.

A integração exata das equações de Saint-Venant é muito complexa e sua solução analítica só é possível em casos especiais. Por isso foram requeridas técnicas numéricas de resolução e também há necessidade de grande quantidade de dados hidráulicos dos canais ou planos (Porto, 1999).

Existem dois modelos para a solução do problema, o de difusão e o da onda cinemática. Eles são simplificações da equação de Saint-Venant. O modelo de difusão negligencia os termos das acelerações locais e convectivas, mas inclui os termos de pressão (que permite levar em conta os efeitos de jusante), da gravidade e do atrito.

O modelo da onda cinemática é uma simplificação da equação de Saint-Venant, pois despreza os termos de aceleração local e convectiva e os termos de pressão. Isto é, ele assume que $S_0 = S_f$ e as forças de atrito e gravidade contrabalanceiam cada uma (Chow *et al.*, 1988).

As simplificações do modelo da onda cinemática são:

- a força de atrito e a gravidade são preponderantes sobre os demais termos da equação dinâmica;
- a relação entre a vazão e a área molhada é dada por $Q = \alpha A^\beta$, onde α e β são parâmetros da onda cinemática para a geometria do canal ou plano;
- a onda cinemática é mais importante que as pequenas perturbações que se comportam como uma onda dinâmica;
- o modelo simula somente os efeitos de montante;

- o amortecimento da onda simulada nesse modelo é devido ao armazenamento, já que não ocorre amortecimento devido a efeitos dinâmicos.

Existem alguns elementos que necessitam ser atendidos para a aplicação do modelo da onda cinemática. Esses elementos são:

- a) comparação das celeridades: a condição de que a celeridade da onda dinâmica seja maior do que a onda cinemática. Nesse caso resulta a condição de que $F < 1,5$, onde F é o número de Froude: $F = \frac{V_o}{\sqrt{g \cdot y_o}}$, onde V_o = velocidade (m/s), g = força da gravidade (m/s^2), y_o (m) = profundidade. Essa é uma condição necessária, mas não suficiente, já que na maioria dos escoamentos o número de Froude é menor que 1;
- b) índice K : Liggett e Woolhiser (1967) *apud* Tucci (1993a) utilizaram uma equação linear da onda cinemática e apresentaram o fator K : $K = \frac{S_o \cdot L_o}{F^2 \cdot y_o}$, onde S_o = declividade do plano de escoamento (m/m), L_o = comprimento longitudinal do escoamento (m), y_o = profundidade (m), F = número de Froude (adimensional). O modelo da onda cinemática é uma boa aproximação para $K > 20$;
- c) Ponce *et al.* (1978) *apud* Tucci (1993a) analisaram as equações de Saint Venant baseando-se em uma solução de linearidade e concluíram que para 95% de precisão o modelo de onda cinemática é aplicável para a seguinte desigualdade: $\frac{T \cdot S_o \cdot V_o}{y_o} \geq 171$, onde T = período da onda (s), S_o = declividade do plano de escoamento (m/m), V_o = velocidade do escoamento (m/s), y_o = profundidade (m). Como essa desigualdade leva em conta o período da onda, é de se esperar que ela seja um melhor indicador do que as demais.

A onda cinemática pode ser resolvida tanto analiticamente quanto numericamente. Para a solução numérica é utilizado o método das diferenças finitas, sendo que existem dois esquemas para resolução, o linear e o não-linear. A equação da onda cinemática para o esquema não-linear pode ser expressa da seguinte forma pela Equação 4.9:

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{A_{i+1}^{j+1} - A_{i+1}^j}{\Delta t} = \frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \quad (\text{Equação 4.9})$$

Q é tomado como uma variável independente. O subíndice i descreve os passos do espaço, enquanto o supraíndice j é relacionado com o tempo. Para as Equações 4.10 e 4.11 tem-se:

$$A_{i+1}^{j+1} = \alpha(Q_{i+1}^{j+1})^\beta \quad (\text{Equação 4.10})$$

$$A_{i+1}^j = \alpha(Q_{i+1}^j)^\beta \quad (\text{Equação 4.11})$$

Substituindo as Equações 4.10 e 4.11 na Equação 4.9 tem-se:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{i+1}^{j+1} + \alpha(Q_{i+1}^{j+1})^\beta = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha(Q_{i+1}^j)^\beta + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \quad (\text{Equação 4.12})$$

A Equação 4.12 tem os termos diferentes de Q_{i+1}^{j+1} no lado direito. Como essa equação não é linear, será resolvida pelo método de Newton. Agrupando o lado direito da Equação 4.12, tem-se:

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha(Q_{i+1}^j)^\beta + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \quad (\text{Equação 4.13})$$

Pode-se definir a função erro residual como:

$$f(Q_{i+1}^{j+1}) = \frac{\Delta t}{\Delta x} Q_{i+1}^{j+1} + \alpha(Q_{i+1}^{j+1})^\beta - C \quad (\text{Equação 4.14})$$

Derivando-se $f(Q_{i+1}^{j+1})$ pela primeira vez, tem-se:

$$f'(Q_{i+1}^{j+1}) = \frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha\beta(Q_{i+1}^{j+1})^{\beta-1} \quad (\text{Equação 4.15})$$

O objetivo é encontrar Q_{i+1}^{j+1} que leva $f(Q_{i+1}^{j+1})$ a zero. O método de Newton com aproximação de primeira ordem resulta em:

$$(Q_{i+1}^{j+1})_{k+1} = (Q_{i+1}^{j+1})_k - \frac{f(Q_{i+1}^{j+1})_k}{f'(Q_{i+1}^{j+1})_k} \quad (\text{Equação 4.16})$$

O subíndice k é um contador numérico do método de Newton. O critério para convergência é:

$$|f(Q_{i+1}^{j+1})| \leq \varepsilon \quad (\text{Equação 4.17})$$

O critério para convergência é $\varepsilon = 0,01C$ (Li *et al.*, 1975 *apud* Genz, 1994).

Uma boa aproximação inicial para Q_{i+1}^{j+1} é utilizar a equação linear, que é dada por:

$$(Q_{i+1}^{j+1})_0 = \frac{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} Q_i^{j+1} + \alpha \beta Q_{i+1}^j \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} + \Delta t \left(\frac{q_{i+1}^{j+1} + q_{i+1}^j}{2} \right) \right]}{\left[\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \beta \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right)^{\beta-1} \right]} \quad (\text{Equação 4.18})$$

Chow *et al.* (1988) afirmam que o esquema numérico apresentado é incondicionalmente estável e que a discretização numérica influencia na precisão dos resultados. Afirmam também que a razão $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ não influencia significativamente a forma do hidrograma.

Os parâmetros α e β para planos podem ser determinados através das seguintes equações (Genz, 1994):

a) Manning

$$\alpha = \left(\frac{n}{\sqrt{S_o}} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (\text{Equação 4.19})$$

$$\beta = 0,6 \quad (\text{Equação 4.20})$$

em que n é o coeficiente de rugosidade de Manning e S_0 é a declividade do plano em m/m.

b) Darcy-Weisbach

$$\alpha = \left(\frac{a_2 v^{b_2}}{8gS_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Equação 4.21})$$

$$\beta = \frac{2 - b_2}{3} \quad (\text{Equação 4.22})$$

em que a_2 e b_2 são funções da intensidade da precipitação e da rugosidade, v é a viscosidade cinemática do fluido, em m^2/s e g a aceleração da gravidade, em m/s^2 .

c) Regime laminar

$$\alpha = \left(\frac{3v}{gS_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Equação 4.23})$$

$$\beta = \frac{1}{3} \quad (\text{Equação 4.24})$$

Chen e Wong (1990) mostram que coeficiente de atrito por Darcy-Weisbach é mais apropriado que o coeficiente de Manning para a análise de escoamento em planos assim como tem justificação teórica e boa concordância com os dados experimentais. Genz (1994) comparou os dados de simulação de chuva para as equações de Manning e laminar. A formulação de Manning se mostrou mais adequada para representar os hidrogramas de escoamento sobre os planos construídos com gramas e paralelepípedos, motivo esse porque a formulação de Manning foi usada para o cálculo numérico da onda cinemática.

Chow (1959) afirma que existe uma grande dificuldade na determinação do coeficiente de rugosidade n . Pode-se determinar o coeficiente de rugosidade de Manning fazendo um ajuste do hidrograma experimental obtido nas superfícies de escoamento com os dados teóricos através da equação numérica da onda cinemática. O ajuste é feito na ascensão, pico e recessão do hidrograma.

5. METODOLOGIA

Esse capítulo mostra como foi desenvolvida toda a metodologia do trabalho, desde a construção das superfícies permeáveis até a aplicação dos dados experimentais em um estudo de caso.

5.1. REALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE CHUVA NAS SUPERFÍCIES PERMEÁVEIS

A área experimental onde foram construídas as superfícies permeáveis está localizada em um condomínio horizontal no município de Sobradinho, Distrito Federal. A Figura 5.1 mostra o local do experimento.



Figura 5.1 – Foto aérea com o detalhe do local do experimento

Foram quatro tipos de superfícies permeáveis estudadas nessa área experimental: grama, chão batido, bloco maciço e bloco vazado. No total foram dez parcelas experimentais construídas, que são:

- uma superfície gramada com declividade de 6%;
- uma superfície de chão batido com declividade de 3,5%;

- duas superfícies de blocos maciços sem a compactação da base, sendo uma com declividade de 2% e outra de 7%;
- duas superfícies de blocos maciços com a base compactada, sendo uma com declividade de 2% e outra de 6%;
- duas superfícies de blocos vazados sem a compactação da base, sendo uma com declividade de 2% e outra de 7%;
- duas superfícies de blocos vazados com a compactação da base, sendo uma com declividade de 2% e outra de 6%.

Depois de instaladas as parcelas experimentais foram coletadas amostras de solo do local do experimento para a análise granulométrica e classificação segundo as normas da ABNT. O apêndice A mostra a classificação do solo e as curvas granulométricas de todas as amostras coletadas.

Para a realização dos experimentos foi tomada uma área de 1m^2 para todas as superfícies. A delimitação dessa área foi feita através de um quadro metálico, que possuía uma pequena abertura frontal para o recolhimento do escoamento superficial. O detalhe do quadro metálico é mostrado na Figura 5.2, e as Figuras 5.3 e 5.4 mostram as superfícies com os respectivos quadros instalados.

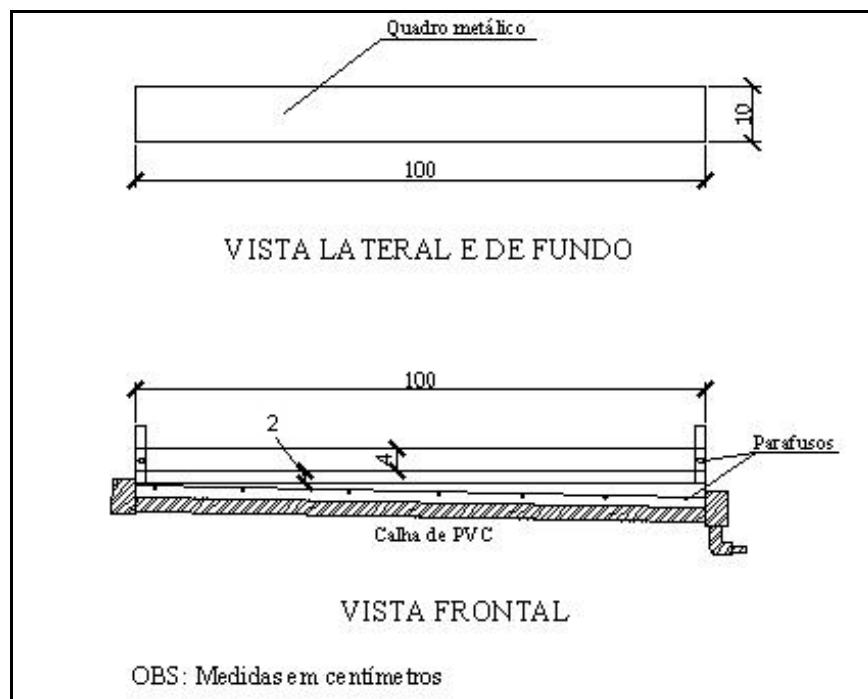
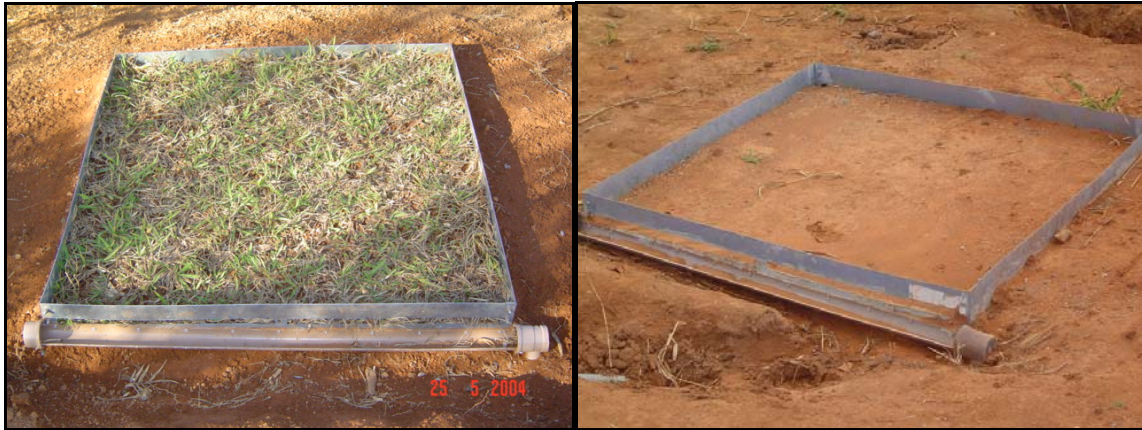


Figura 5.2 – Detalhe do quadro metálico instalado nas superfícies permeáveis



(a) (b)
Figura 5.3 – Superfícies permeáveis: (a) grama; (b) chão batido



(a) (b)
Figura 5.4 – Superfícies permeáveis: (a) blocos maciços; (b) blocos vazados

Na parcela experimental de chão batido o quadro foi instalado diretamente no terreno a uma profundidade de 5 cm. Para a superfície gramada, foi plantada uma grama da espécie *Paspalum notatum*, mais conhecida como grama batatais, para logo depois o quadro metálico também ser instalado. Para as superfícies de blocos maciços e vazados sem a base compactada, o terreno foi escavado 10 cm na profundidade, preenchido com areia até uma altura de 3 cm, para depois os blocos serem assentados. No caso dos blocos vazados, os espaços vazios foram preenchidos com areia. A instalação do quadro foi feita na superfície dos blocos com argamassa de cimento. A diferença na instalação para com as superfícies de bases compactadas foi que a base do terreno escavado teve uma compactação do solo antes do preenchimento da areia.

Para a realização das simulações de chuva, o simulador usado foi desenvolvido por Silva e Campana (2004). Ele se caracteriza pela formação de chuva através de um movimento

rotacional de 22 aspersores distanciados de forma diferente a fim de manter a uniformidade da precipitação. Esse simulador foi desenvolvido especificamente para a simulação de chuvas em áreas de 1 m^2 , tendo como principais características:

- possibilidade de fixar as intensidades de precipitações a serem simuladas;
- intensidades de precipitação variando de 50 a 200 mm/h;
- coeficiente de uniformidade de Christiansen maior que 90%.

A Figura 5.5 mostra o detalhe do simulador utilizado na pesquisa e a figura 5.6 mostra o funcionamento do simulador de chuva.

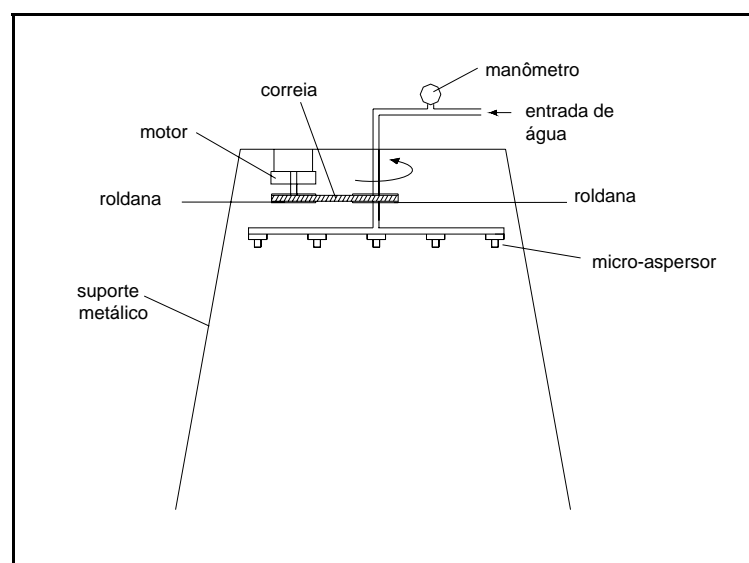


Figura 5.5 – Detalhe do simulador de chuva utilizado no experimento (Silva e Campana, 2004)



Figura 5.6 – Exemplo do funcionamento do simulador de chuva

Os experimentos para as superfícies de blocos maciços e vazados foram realizados primeiramente entre os dias 12/08/2004 e 28/09/2004, e depois foram retomados entre os dias 17/11/2004 e 09/12/2004. Nos ensaios dos meses de agosto e setembro procurou-se avaliar a influência do tipo de superfície e da declividade da parcela na geração do escoamento superficial. Nos meses de novembro e dezembro procurou-se mostrar o efeito da passagem de veículos e da colmatação por sedimentos na geração do escoamento superficial. Para as superfícies de grama e solo batido os ensaios foram do dia 05/05/2005 até 16/05/2005.

Antes da realização das simulações, o equipamento era centrado e nivelado em relação às parcelas experimentais, além de calibrado para a precipitação desejada. Essa calibração era feita através do volume precipitado coletado por uma bandeja metálica impermeável em um certo intervalo de tempo. A partir daí tinha-se o início do experimento, na qual o escoamento era coletado em um reservatório graduado e o seu volume era lido a cada 30 segundos por uma régua que possuía um circuito elétrico. Para cada parcela experimental foram realizadas simulações com pelo menos duas intensidades diferentes de precipitação.

5.2. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Durante a realização dos ensaios experimentais, as leituras do escoamento foram feitas por uma régua que possuía um circuito elétrico que fechava no exato momento do toque da superfície da água que estava armazenada no reservatório graduado. Essas leituras forneciam a vazão escoada sobre as superfícies permeáveis em certos intervalos de tempo, ou seja, um hidrograma de escoamento superficial. Através da diferença entre a precipitação e o hidrograma tinha-se como resultado a curva da taxa de infiltração para a superfície.

Esse procedimento foi realizado em todos os ensaios nas parcelas experimentais, sendo que as curvas das taxas de infiltração eram comparadas para intensidade diferentes de precipitação na mesma parcela.

Para que se pudesse descrever o comportamento da taxa de infiltração ao longo do tempo, procurou-se ajustar os modelos de infiltração de Horton e Philip aos dados observados.

Os hidrogramas e as curvas das taxas de infiltração das parcelas experimentais de chão batido, blocos maciços e blocos vazados foram comparados com o hidrograma e curva de taxa de infiltração da superfície gramada. Dados como o tempo de embebição da superfície, tempo de ascensão, vazão de pico e coeficiente de escoamento foram analisados para cada superfície.

Os efeitos da colmatção por sedimentos e da passagem de veículos foram analisados nas superfícies de blocos maciços e vazados, a fim de verificar a perda da eficiência das superfícies.

5.3. CONTROLE DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM ÁREAS DE ESTACIONAMENTO

Foi realizado um estudo de caso a fim de verificar o impacto hidrológico causado por determinados tipos de superfícies urbanas no controle do escoamento superficial. Foram estudadas as superfícies de asfalto, de blocos maciços, de blocos vazados, chão batido e grama.

Um novo edifício para o Instituto de Biologia está sendo construído na Universidade de Brasília. Esse edifício contará com uma ampla área de estacionamento, que pelo projeto original será coberto por uma superfície asfáltica. Esse estacionamento foi tomado como área de estudo. Nessa área foi feito um estudo mostrando o benefício do uso das coberturas de blocos maciços, blocos vazados e o chão batido em relação à cobertura asfáltica.

Foi feita uma simulação analítica na área, onde o modelo de propagação usado foi o da onda cinemática. Para facilitar a utilização do modelo, o estacionamento foi dividido em seis planos retangulares de escoamento. As dimensões desses planos são mostradas na Figura 5.7.

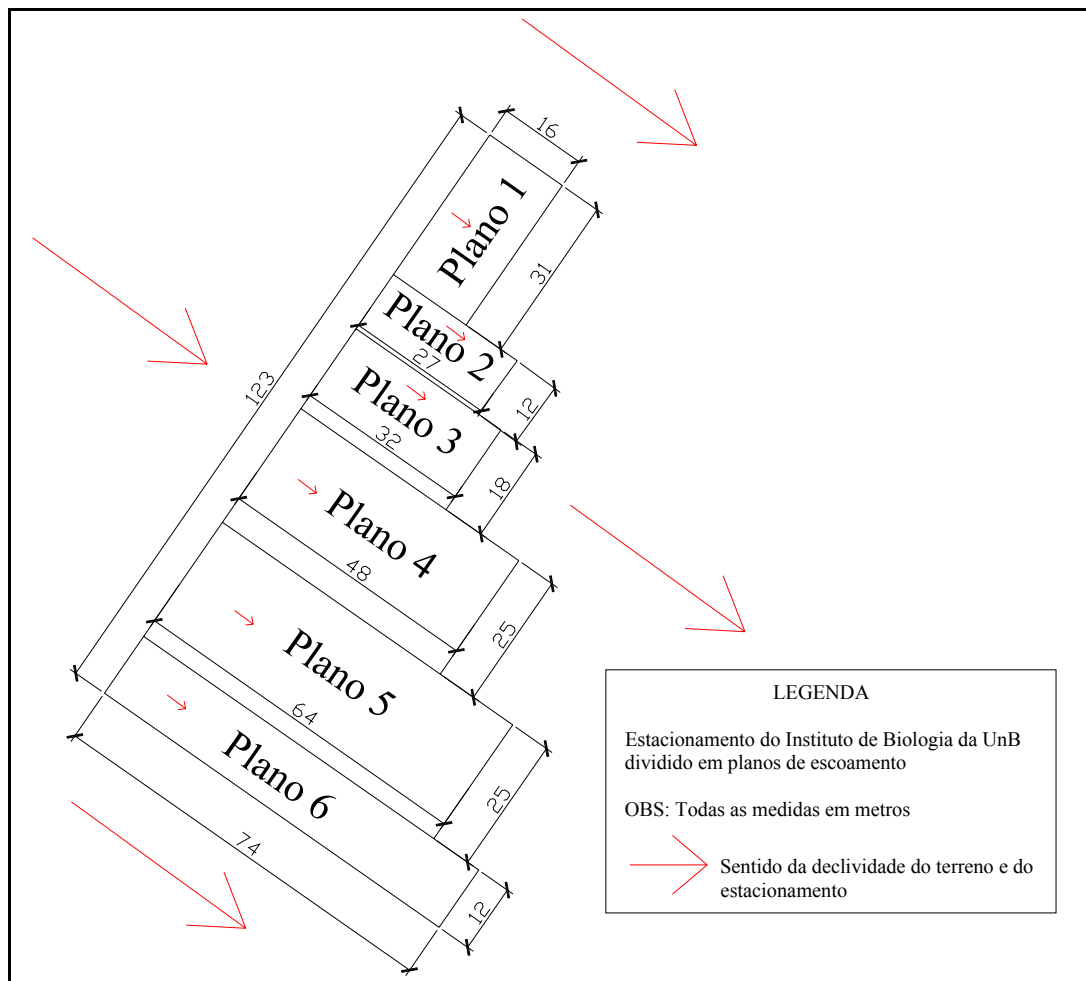


Figura 5.7 – Estacionamento com o detalhe dos planos de escoamento

Para o estudo foram adotadas três diferentes precipitações com tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos e duração de 10 minutos. A intensidade foi calculada através da equação da curva IDF utilizada nos projetos de drenagem urbana do Distrito Federal (NOVACAP, 1999). Essas intensidades de precipitação foram utilizadas pelo modelo da onda cinemática para a propagação do escoamento.

Para a propagação do escoamento no estacionamento foi necessário primeiramente ajustar os coeficientes de Manning para todas as superfícies de blocos maciços, blocos vazados e chão batido. Para o asfalto o coeficiente de rugosidade de Manning foi adotado como 0,015, valor também usado por Milograna (2001). Logo em seguida, foi verificada a validade de aplicação do modelo da onda cinemática através dos critérios da celeridade da onda cinemática, do índice K e da desigualdade de Ponce.

Para cada tipo de cobertura o escoamento foi propagado pela onda cinemática em todos os planos, sendo que as curvas de taxa de infiltração foram utilizadas para determinar a chuva efetiva. Para o asfalto foi adotada uma declividade de 2% e taxa de infiltração nula. Para as superfícies de chão batido, blocos vazados, blocos maciços e grama a declividade adotada foi de 2%. As curvas das taxas de infiltração obtidas para as superfícies permeáveis no testes experimentais foram adotadas nesse estudo de caso.

O escoamento propagado em cada plano do estacionamento foi recolhido por uma sarjeta. Na sarjeta, o escoamento era novamente propagado e levado para uma galeria de drenagem pluvial. Na galeria, os escoamentos de todos os planos eram somados e propagados até uma estrutura de controle, que nesse caso foi um reservatório de detenção. O esquema do estacionamento, das sarjetas, da galeria e do reservatório pode ser visto na Figura 5.8.

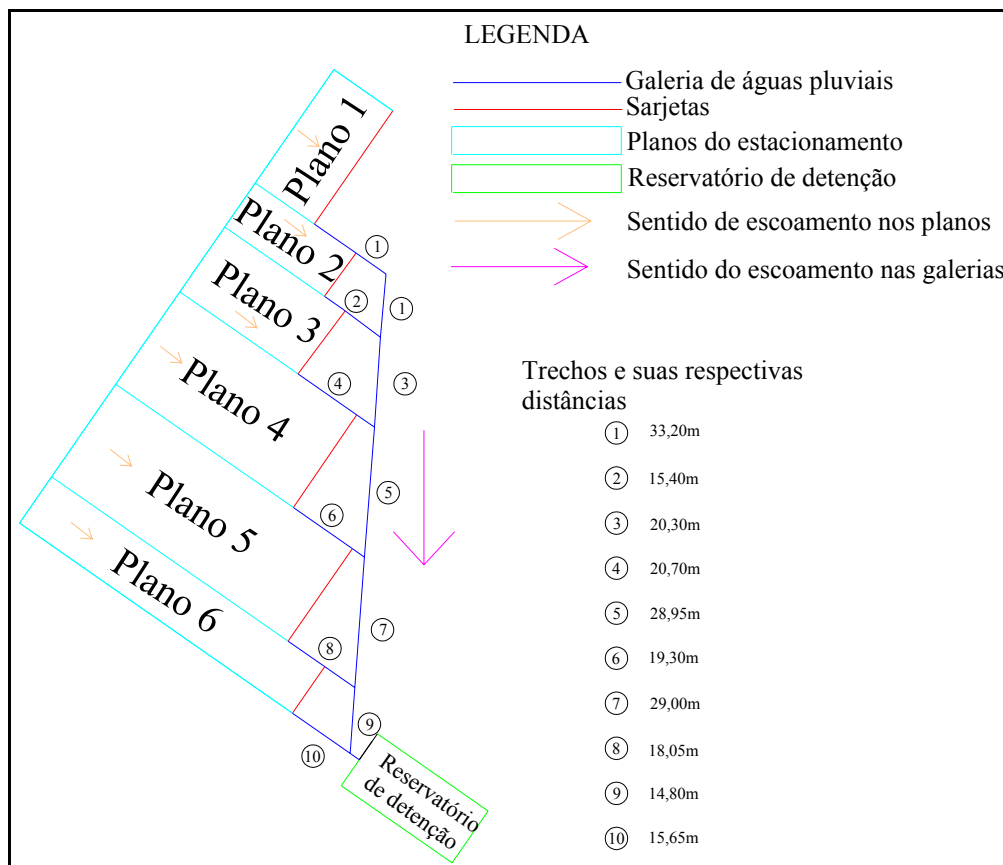


Figura 5.8 – Detalhe das estruturas utilizadas para o controle do escoamento superficial

Os hidrogramas finais das superfícies de asfalto, blocos vazados e maciços e chão batido foram comparados com os hidrogramas das superfícies gramadas em relação à vazão de

pico, tempo de ascensão e volume do hidrograma, a fim de quantificar o impacto da mudança de cobertura da superfície.

Para o controle dos hidrogramas e seus impactos na bacia hidrográfica, a estrutura final de controle adotada foi um reservatório de detenção. A vazão máxima de saída permitida foi a obtida das superfícies gramadas. Acima desse valor o reservatório se fazia necessário. Para a simulação da propagação no reservatório foi utilizado o método de Pulz, que por meio da diferença entre as vazões de entrada e saída fornece o armazenamento do reservatório. O detalhe do reservatório pode ser visto na Figura 5.9.

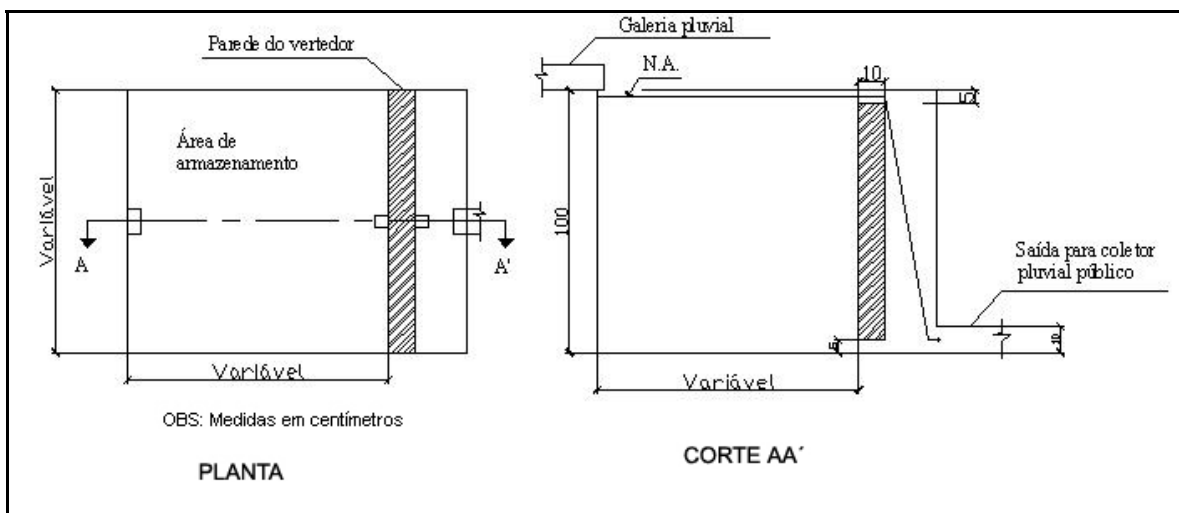


Figura 5.9 – Reservatório de detenção para o armazenamento do excesso de escoamento

6. RESULTADOS DO ESTUDO EXPERIMENTAL E DO ESTUDO DE CASO

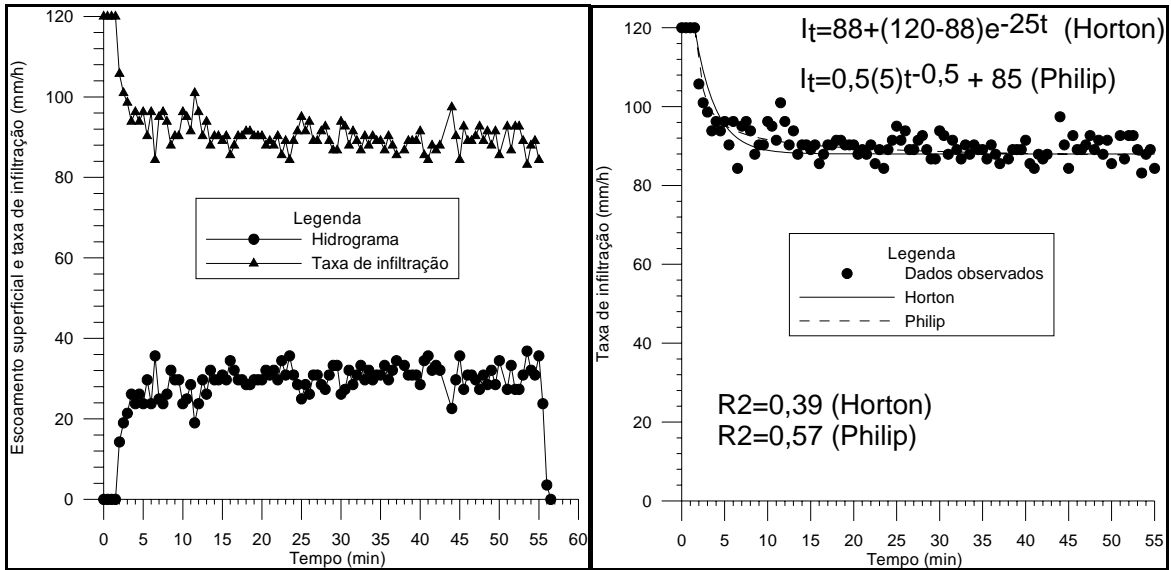
6.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS EM PARCELAS EXPERIMENTAIS

6.1.1. Parcela gramada

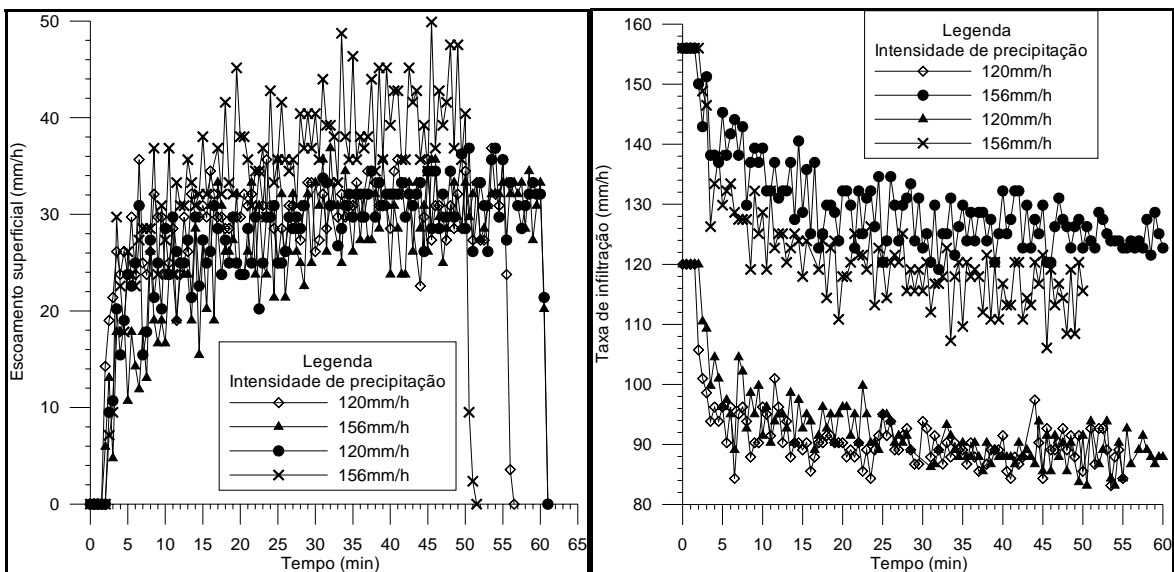
Primeiramente, três simulações de chuva foram realizadas na superfície gramada, e em nenhum dos ensaios foi observado a ocorrência de escoamento superficial. O primeiro foi no dia 11/08/2004, com intensidade de 120 mm/h e duração de 1 hora, e o segundo no dia 25/08/2004, com intensidade de 120 mm/h e duração de 50 minutos. O longo período sem chuvas (67 dias para o primeiro ensaio e 81 dias para o segundo), resultou na baixa umidade do solo, que juntamente com a interceptação vegetal e a baixa compactação do terreno, contribuíram para que não houvesse o escoamento superficial.

O terceiro experimento foi no dia 09/12/2004, com intensidade de 192 mm/h e duração de 1 hora e 30 minutos. Apesar da umidade inicial do solo ter sido maior que nos dois experimentos anteriores, devido às primeiras chuvas naturais ocorridas na região (no dia 08/12/2004, por exemplo, choveu 6 mm), ainda assim não foi suficiente para a formação do escoamento superficial.

Uma pequena pausa foi dada nas simulações para a superfície gramada, sendo as mesmas retomadas no mês de maio de 2005, quando todo o período chuvoso tinha acabado. O último dia de chuva antes do início dos ensaios foi 30/04/2005, com 0,1 mm de precipitação, mas entre os dias 19/04/2005 e 30/04/2005 choveu um total de 84,7 mm. Foram feitas quatro simulações na parcela de grama. Na Figura 6.1 são apresentados os resultados da simulação do dia 05/05/2005, com intensidade de precipitação de 120 mm/h e duração de 55 minutos. Os hidrogramas e as curvas das taxas de infiltração de todos os ensaios estão mostrados nas Figuras 6.2.



(a) (b)
 Figura 6.1 – Simulação1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados



(a) (b)
 Figura 6.2 – Resultado de todas as simulações do período úmido/2005: (a) hidrogramas da superfície gramada; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície gramada

No início de todas as simulações pode-se observar trechos horizontais nas curvas de taxas de infiltração. Esses trechos indicam que a superfície ainda não se encontrava saturada, e que a capacidade de infiltração nos instantes iniciais foi superior a intensidade de precipitação simulada.

Os resultados de todas as simulações para a superfície gramada são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resumo das simulações para a superfície gramada

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
Data	05/05/2005	10/05/2005	12/05/2005	16/05/2005
t_e (s)	90	90	120	120
t_m (s)	330	840	300	1080
t_u (s)	3300	3600	3600	3000
t_f (s)	1390	3660	3660	3090
i (mm/h)	120	156	120	156
V_{esc} (L)	26,47	26,31	27,83	28,52
V_{prec} (L)	110,09	156,12	120,10	130,10
i_c (mm/h)	88	124	88	114
C	0,24	0,17	0,23	0,22

Na Tabela 6.1 tem-se o resumo das simulações realizadas na superfície gramada. Os termos t_e , t_m , t_u e t_f são, respectivamente, os tempos de embebição do solo, do fim do regime transitório e início do regime permanente, do fim da precipitação e do fim do escoamento na superfície. O termo i é a intensidade da chuva, V_{esc} é o volume total escoado, V_{prec} é o volume total precipitado, i_c é a infiltração de base da superfície e C é o coeficiente de escoamento superficial.

Observa-se na Figura 6.1 que rapidamente o escoamento superficial atingiu o regime permanente. A provável explicação é pela condição de umidade inicial, que estava alta devido a chuvas naturais que ocorreram antes da realização do experimento. Essa alta umidade inicial também se verificou na simulação 3, como pode ser visto por meio do tempo para se atingir o regime permanente (t_m) na Tabela 6.1.

As simulações 2 e 4 apresentaram valores de infiltração de base superiores aos valores observados das simulações 1 e 3. A anisotropia e a heterogeneidade do solo pode ter feito com que o fluxo de água interior do solo tenha sido diferente nessas simulações, o que explica esses diferentes resultados. Outra explicação plausível é que a umidade do solo pode ter variado entre essas simulações.

O coeficiente de escoamento teve uma variação de 29,5% entre as simulações 2 e 4, ambas com a mesma intensidade de precipitação. Isso pode ser explicado pelo fato do coeficiente de escoamento depender de vários fatores, que vão desde a intensidade, duração e distribuição da precipitação, e também da retenção superficial. Mas ele se encontra dentro da faixa de valores propostos por Wilken (1978) para a cidade de São Paulo.

O ajuste dos parâmetros da equação de Horton foi manual, e só foi possível a partir do instante da saturação da superfície. Para verificar o grau de aderência do ajuste manual aos dados observados foi utilizado o coeficiente de determinação $R^2 = 1 - N/D$, onde N é o somatório do quadrado da diferença entre as infiltrações observadas e calculadas e o denominador D é o somatório do quadrado da diferença entre as infiltrações observadas e a média das infiltrações observadas. Os valores ajustados são do experimento do dia 05/05/2005, pois foi o que apresentou a menor infiltração de base e o maior coeficiente de escoamento superficial. O tempo de embebição para este ensaio foi de 1 minuto e 30 segundos. Os parâmetros foram:

$$I_0 = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 88 \text{ mm/h}$$

$$K = 25 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,39$$

Para a equação de Philip só foi possível ajustar os parâmetros, assim como no modelo de Horton, depois da saturação da superfície. Os parâmetros ajustados foram do dia 05/05/2005, pois foi a simulação que resultou em um maior coeficiente de escoamento e menor infiltração de base. Os parâmetros foram:

$$S = 5 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 85 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,57$$

No ajuste das equações de Horton e Philip verificou-se que o coeficiente de determinação R^2 apresentou pouca aderência aos dados observados. A variação nos valores de infiltração observados nas simulações da superfície gramada pode ter contribuído para esses baixos valores do coeficiente de determinação.

6.1.2. Chão Batido

Para o chão batido foram realizados quatro experimentos, todos no mês de maio de 2005. Como no caso da parcela gramada, entre os dias 19/04/2005 e 30/04/2005 choveu um total de 84,7 mm. A simulação do dia 05/05/2005 é mostrada na Figura 6.3. A Figura 6.4 mostra os hidrogramas e curvas de taxa de infiltração de todas as simulações realizadas no chão batido.

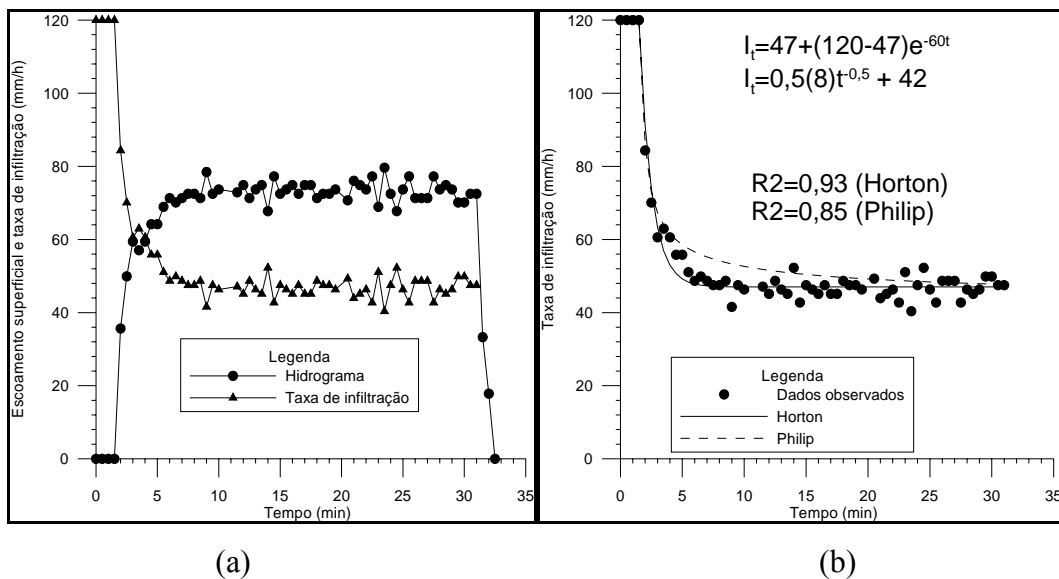


Figura 6.3 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

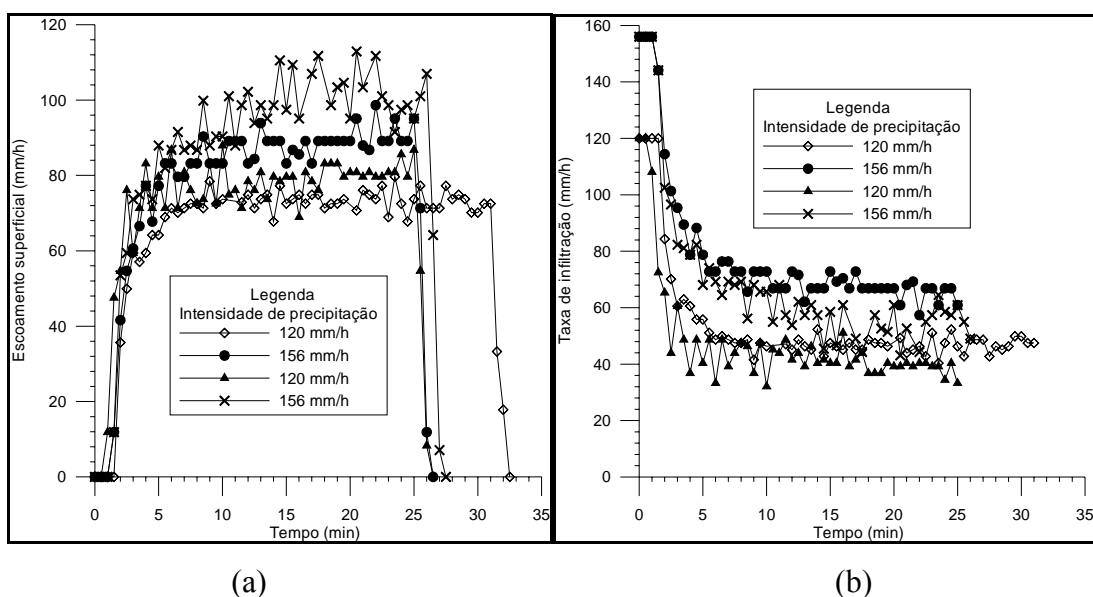


Figura 6.4 – Resultado de todas as simulações do período úmido/2005: (a) hidrogramas da superfície de chão batido; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície de chão batido

No início de todas as simulações pode-se observar trechos horizontais nas curvas de taxas de infiltração. Esses trechos indicam que a superfície ainda não se encontrava saturada, e que a capacidade de infiltração nos instantes iniciais foi superior a intensidade de precipitação simulada.

A Tabela 6.2 mostra o resumo das simulações para a parcela de chão batido.

Tabela 6.2 – Resumo das simulações para a parcela de chão batido

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
Data	05/05/2005	10/05/2005	12/05/2005	16/05/2005
t_e (s)	90	60	30	60
t_m (s)	330	510	240	630
t_u (s)	1860	1500	1500	1560
t_f (s)	1950	1590	1590	1650
i (mm/h)	120	156	120	156
V_{esc} (L)	35,31	33,72	31,42	39,32
V_{prec} (L)	62,05	65,05	50,04	67,65
i_c (mm/h)	47	64	38	55
C	0,57	0,52	0,63	0,58

Como essas simulações foram realizadas no mesmo dia da superfície gramada, a umidade inicial do solo também influenciou nos resultados obtidos. Antes da realização da simulação 1 ocorreram chuvas naturais na área por alguns dias. Isso fez com que a umidade do solo estivesse maior. Entre as simulações 1 e 2, houve dias de intensa radiação solar, que fez com que a umidade do solo diminuísse. O resultado foi que a taxa final de infiltração do solo foi maior para a simulação 2 em relação a 1.

A simulação 3 apresentou valores semelhantes à simulação 1 quanto ao tempo de embebição e a infiltração de base. A explicação plausível é que, além das intensidades das precipitações serem iguais, as condições iniciais de umidade do solo também estavam semelhantes. Isso podia ser comprovado visualmente, pois o solo ao redor da parcela ainda estava úmido por causa da simulação 2.

Já para a simulação 4 os parâmetros de infiltração se aproximaram mais da simulação 2. Os quatro dias de intensa radiação solar contribuíram para a diminuição da umidade do solo e consequentemente nos resultados da simulação.

O coeficiente de escoamento superficial sofreu influência dessa umidade inicial, tanto que o maior coeficiente de escoamento foi obtido para uma precipitação de 120 mm/h e não de 156 mm/h.

Os parâmetros da equação de Horton foram ajustados a partir do tempo em que a superfície se encontrava saturada. Foi tomado o ajuste que produziu o maior escoamento superficial, com o menor valor de infiltração de base, que foi do dia 05/05/2005. O tempo de embebição para esse ensaio foi de 30 segundos. Os parâmetros da equação ajustados aos dados observados foram:

$$I_o = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 47 \text{ mm/h}$$

$$K = 60 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,93$$

Os parâmetros da equação de Philip foram também tomados para o ensaio do dia 05/05/2005 pelos mesmos motivos apresentados anteriormente, resultando:

$$S = 8 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 42 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,85$$

O ajuste aos dados observados para a superfície de chão batido, ao contrário da superfície gramada, apresentou um bom grau de aderência. Verificou-se que o ajuste para a equação de Horton foi melhor do que a equação de Philip.

6.1.3. Blocos maciços

6.1.3.1. Blocos maciços sem a compactação da base

Para as parcelas de BM 2% (BM 2% = sigla de blocos maciços de declividade 2% sem a base compactada) foram feitos cinco ensaios. Os três primeiros foram realizados no mês de agosto, que se caracteriza pela ausência de chuvas naturais, resultando em uma baixa umidade do solo. Essa baixa umidade do solo pode ser comprovada pelos 69 dias sem chuvas. O intervalo foi do dia 03/06/2004, com 5,6 mm de precipitação, e o dia 12/08/2004, dia da primeira simulação. Os dois ensaios restantes foram realizados no mês de dezembro, em que foram observadas as primeiras chuvas do início do verão.

Esses ensaios foram feitos com duas diferentes precipitações, a primeira 120 mm/h e a segunda 84 mm/h. Com isso tinha-se a intenção de verificar o comportamento da curva da taxa de infiltração para diferentes precipitações, além de se poder caracterizar bem a curva de capacidade de infiltração do solo.

A Figura 6.5 mostra o hidrograma e curva da taxa de infiltração para a simulação realizada no dia 12/08/2004 com uma precipitação de 120 mm/h e duração de 25 minutos. A Figura 6.6 mostra todos os hidrogramas e curvas das taxas de infiltração obtidas nos ensaios do mês de agosto.

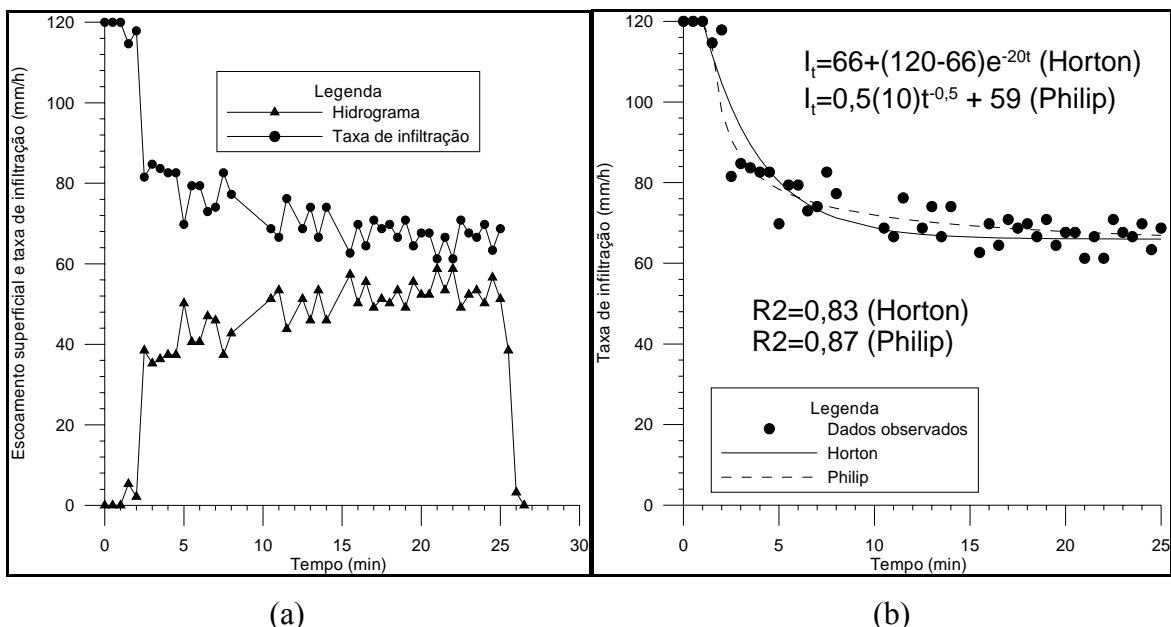
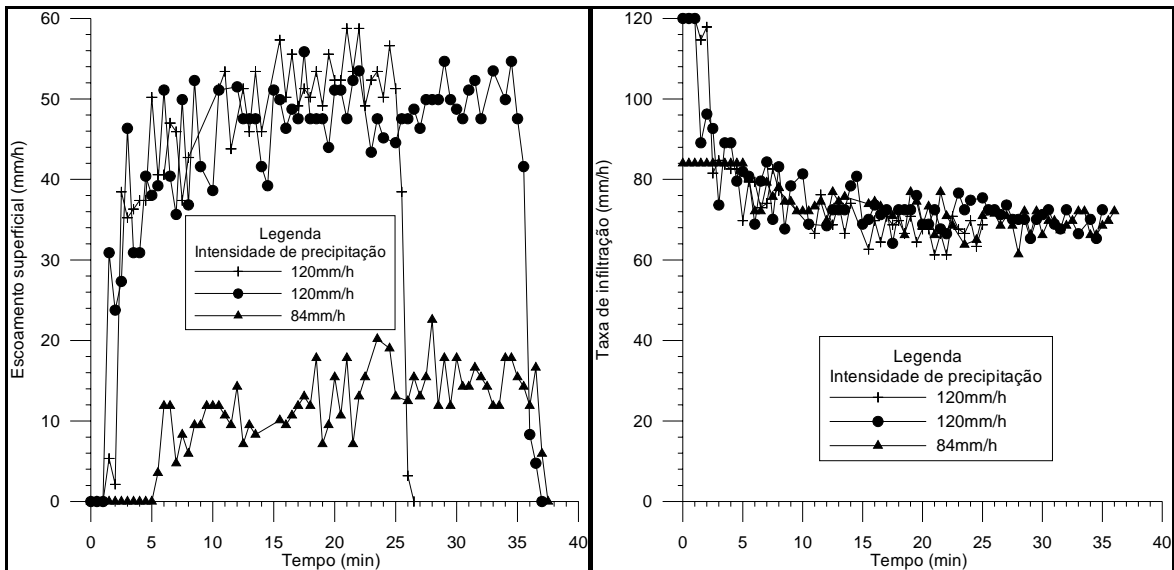


Figura 6.5 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

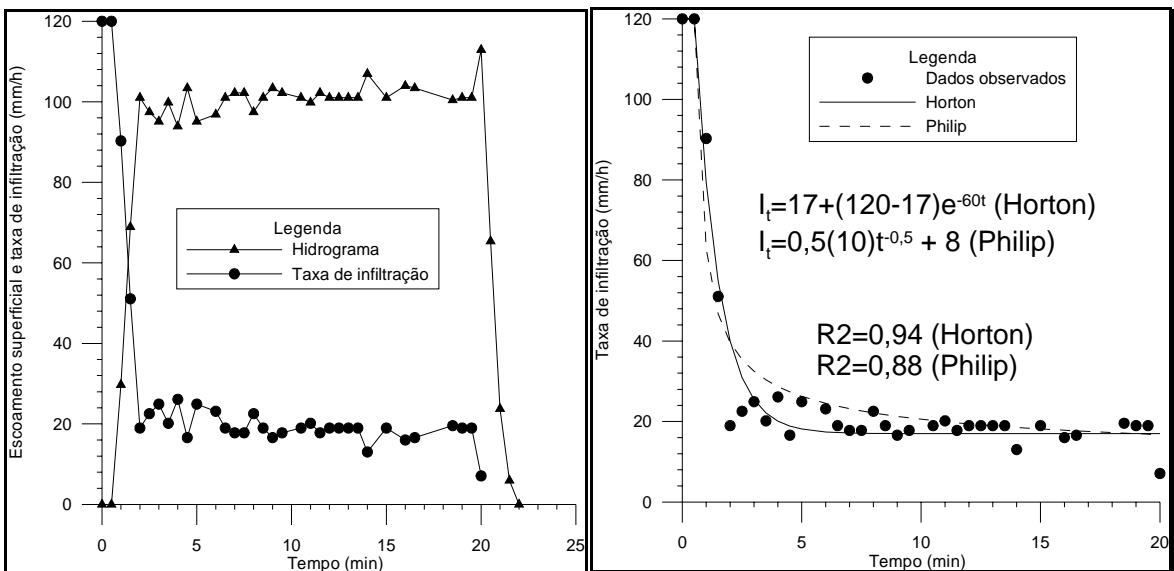


(a)

(b)

Figura 6.6 – Resultado das simulações para o período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BM 2%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BM 2%

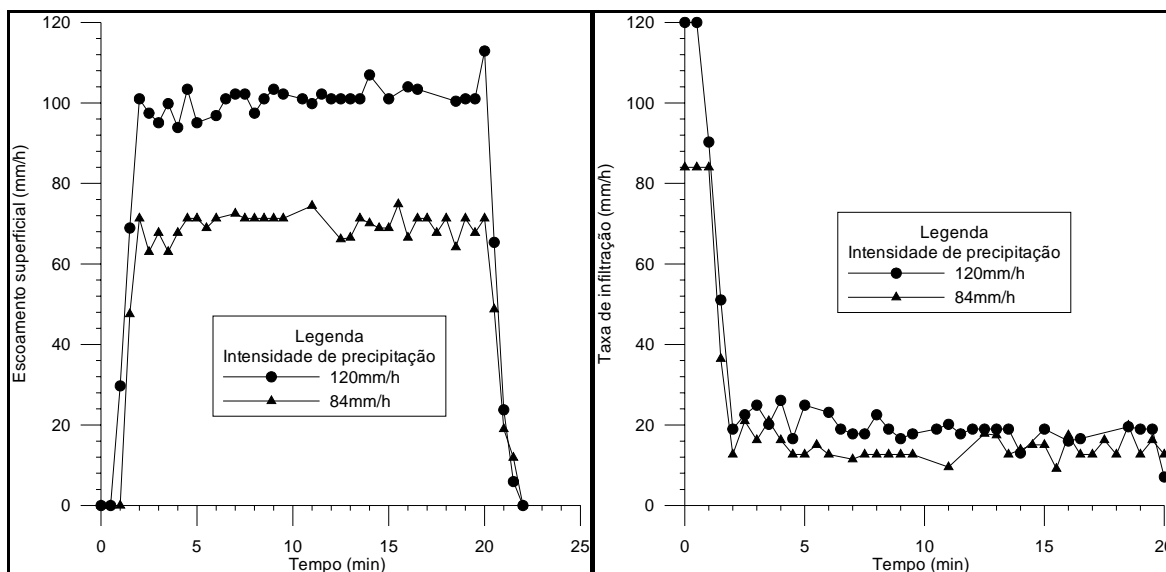
A Figura 6.7 mostra o hidrograma e a curva da taxa de infiltração para a simulação do dia 01/12/2004, que teve intensidade de precipitação de 120 mm/h e duração de 20 minutos. No dia anterior ao ensaio, 30/11/2004, choveu um total de 10 mm. A Figura 6.8 tem um resumo de todas as simulações do mês de dezembro para o BM 2%.



(a)

(b)

Figura 6.7 – Simulação 4 ($i = 120 \text{ mm/h}$; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados



(a) (b)
 Figura 6.8 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BM 2%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BM 2%

A Tabela 6.3 tem um resumo dos parâmetros das simulações para a parcela de blocos maciços sem a base compactada.

Tabela 6.3 – Resumo das variáveis das simulações para o BM 2%

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5
Data	12/08/2004	23/08/2004	25/08/2004	01/12/2004	07/12/2004
t_e (s)	60	60	300	30	60
t_m (s)	750	630	1260	120	120
t_u (s)	1500	2100	2160	1200	1200
t_f (s)	1560	2190	2220	1290	1290
i (mm/h)	120	120	84	120	84
V_{esc} (L)	19,29	26,56	6,77	32,73	22,58
V_{prec} (L)	50,04	70,06	50,44	40,03	28,02
i_c (mm/h)	66	70	69	17	14
C	0,39	0,38	0,13	0,82	0,81

Notam-se diferenças nos parâmetros de escoamento e infiltração entre as simulações 1, 2 e 3 e as simulações 4 e 5. Observando a Figura 6.5, referente à simulação 1, e comparando-a

com a Figura 6.7, da simulação 4, vê-se o menor volume de escoamento e maior taxa de infiltração para a simulação 1. Isso foi devido à colmatação da superfície para a simulação 4. A colmatação da superfície fez com que os tempos de embebição e de entrada do regime permanente fossem menores para as simulações 4 e 5. Já para as simulações 1, 2 e 3, os tempos de embebição e entrada do regime permanente foram menores para a precipitação de maior intensidade, devido a saturação da superfície num tempo menor.

As simulações 4 e 5 tiveram maiores volumes de escoamento, o que acabou por resultar em maiores coeficientes de escoamento que as simulações 1, 2 e 3. Observou-se nas simulações 4 e 5 que apesar de diferentes precipitações, os coeficientes de escoamento foram iguais. Isso pode ser explicado por uma chuva natural que aconteceu no dia 01/12/2004, depois da realização da simulação 4. Isso aumentou a colmatação da superfície, que causou o aumento do escoamento superficial. Para as simulações 1, 2 e 3, o coeficiente de escoamento foi maior para as precipitações de maior intensidade, já que o coeficiente de escoamento também é dependente da intensidade de precipitação.

Os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.5, que não tinha o efeito da colmatação da superfície, foram:

$$I_0 = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 66 \text{ mm/h}$$

$$K = 20 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,83$$

Os parâmetros ajustados para a equação de Philip na Figura 6.5 foram:

$$S = 10 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 59 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,87$$

Deve-se lembrar que esse ajuste só foi feito a partir do momento em que a superfície se encontrava saturada, ou seja, após 1 minuto do início do experimento. Os parâmetros ajustados para a simulação 1, que foi a que apresentou o maior coeficiente de escoamento e a menor taxa de infiltração. O coeficiente de determinação R^2 mostra que houve uma boa aderência aos dados observados tanto por Horton quanto por Philip.

O ajuste dos parâmetros da equação de Horton na Figura 6.7, em que a parcela teve o efeito da colmatção da superfície, foi:

$$I_o = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 17 \text{ mm/h}$$

$$K = 60 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,94$$

Os parâmetros da equação de Philip para a Figura 6.7 foram:

$$S = 10 \text{ mm/h}^{1/2}$$

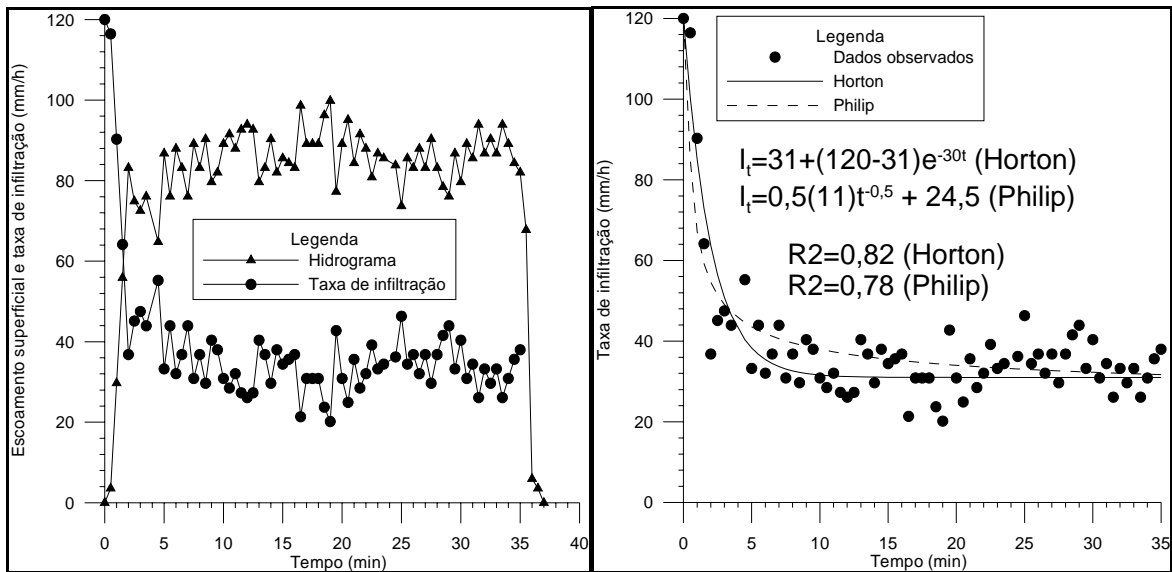
$$A = 8 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,88$$

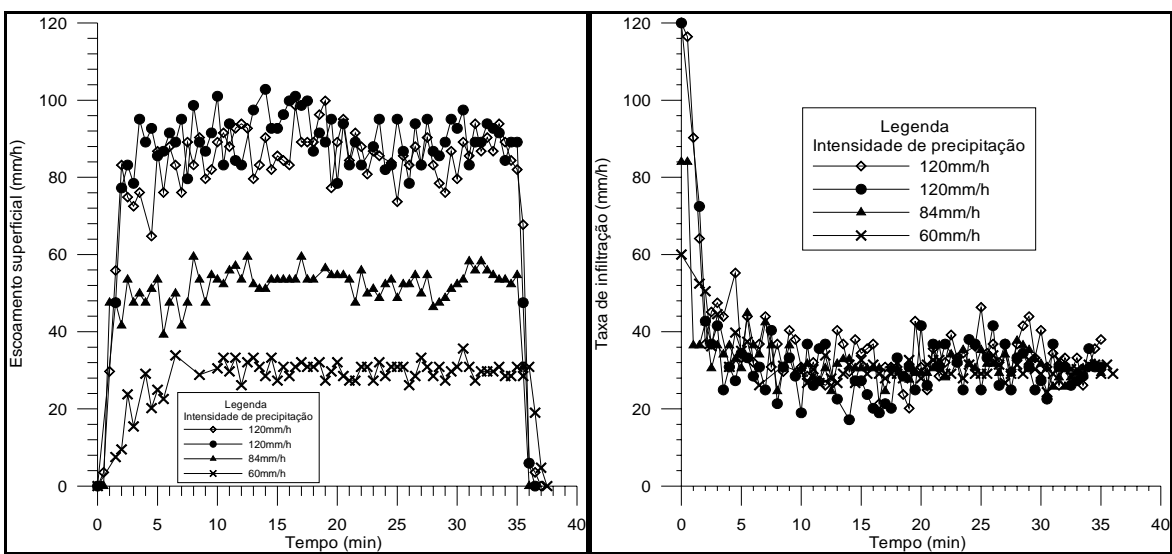
Esse ajuste foi feito para a simulação 4, pois a mesma apresentou um maior coeficiente de escoamento, com uma infiltração de base próxima a da simulação 5. Assim como no período seco, houve uma boa aderência aos dados observados tanto por Horton quanto por Philip.

Verificam-se pelas Figuras 6.5 e 6.7 os ajustes dos coeficientes para as equações de Horton e Philip ficaram satisfatórios para os dados observados. A única ressalva é que essas curvas não conseguem ajustar a taxa de infiltração no período de embebição da superfície, pois esses modelos foram criados para representar as curvas de capacidade de infiltração da superfície. Como na fase de embebição tem-se é a taxa de infiltração da superfície e não a capacidade, o ajuste só tem início no ponto em que a taxa se iguala a capacidade de infiltração.

Para a parcela de BM 7% (BM 7% = sigla de blocos maciços de declividade 7% sem a base compactada) foram realizados seis experimentos. As precipitações simuladas foram de 120, 84 e 60 mm/h. Foram 82 sem chuva entre o dia 03/06/2004 e 25/08/2004, dia da primeira simulação. Um dos experimentos foi realizado no dia 25/08/2004 e teve intensidade de precipitação de 120 mm/h e duração de 35 minutos. Na Figura 6.9 tem-se o hidrograma e a curva da taxa de infiltração para a respectiva superfície. Na Figura 6.10 têm-se todos os hidrogramas e curvas de taxas de infiltração para os ensaios realizados na parcela de BM 7% da base nos meses de agosto e setembro.

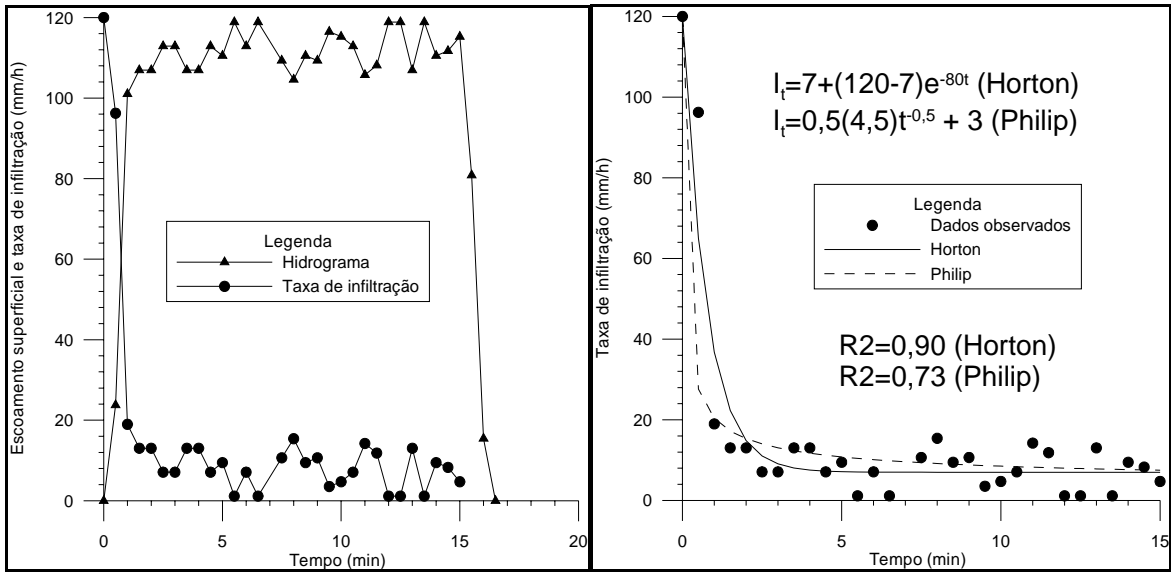


(a) (b)
 Figura 6.9 – Simulação 1 ($i = 120 \text{ mm/h}$; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados



(a) (b)
 Figura 6.10 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BM 7%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BM 7%

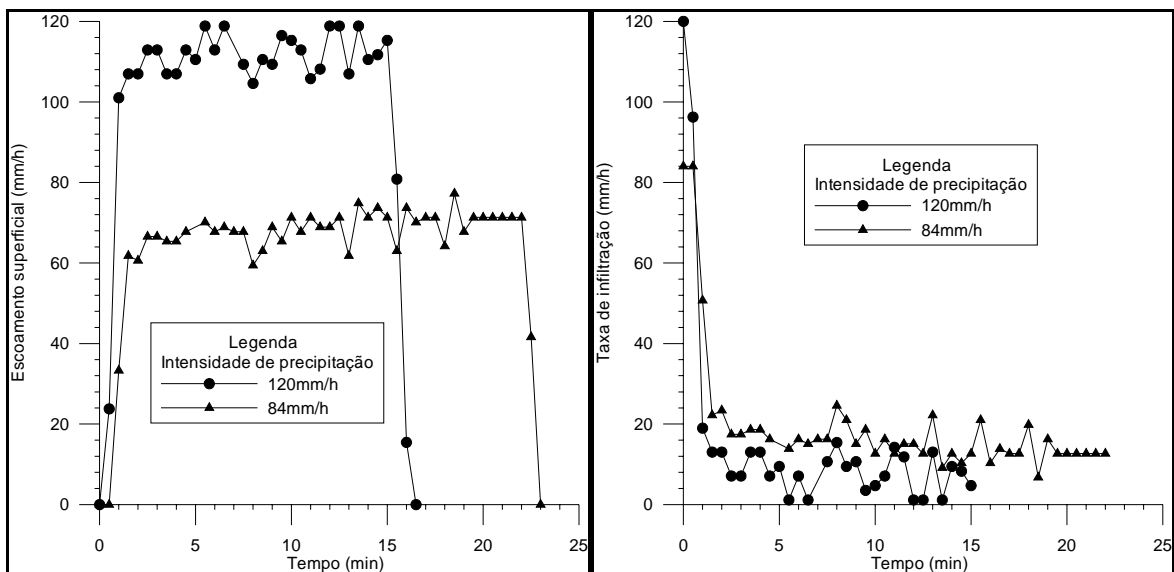
A Figura 6.11 apresenta o hidrograma e a curva de infiltração para o ensaio do dia 07/12/2004, que teve intensidade de precipitação de 120 mm/h e duração de 15 minutos. Nos dias 30 e 01/12/2004 choveu um total de 73 mm, aumentando a umidade do solo. A Figura 6.12 tem o resumo dos ensaios realizados no mês de dezembro.



(a)

(b)

Figura 6.11 – Simulação 5 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados



(a)

(b)

Figura 6.12 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BM 7%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BM 7%

O resumo dos parâmetros das simulações é apresentado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resumo dos parâmetros das simulações para a parcela de BM 7%

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5	Simulação 6
Data	25/08/2004	27/08/2004	27/08/2004	09/09/2004	07/12/2004	09/12/2004
t_e (s)	0	0	30	0	0	30
t_m (s)	300	210	480	390	60	90
t_u (s)	2100	2100	2100	2160	900	1320
t_f (s)	2190	2160	2130	2220	960	1350
i (mm/h)	120	120	84	60	120	84
V_{esc} (L)	48,93	52,01	30,25	17,18	27,93	24,64
V_{prec} (L)	70,06	70,06	49,04	36,03	30,02	30,82
i_c (mm/h)	31	30	29	30	7	13
C	0,70	0,74	0,62	0,48	0,93	0,80

Comparando a infiltração de base da parcela de BM 7% com a de BM 2%, observa-se a menor taxa final de infiltração para a parcela de BM 7%. Com isso pode-se dizer que a declividade teve influência na infiltração da superfície. O tempo de embebição e o tempo de entrada do regime permanente também foram menores para a parcela de blocos maciços de declividade 7%, comprovando a influência da declividade nos resultados.

Observa-se nas Figuras 6.9 a 6.11 assim como na Tabela 6.4 que o regime permanente foi rapidamente atingido em todos os experimentos. A simulação 3 ($i = 84$ mm/h), foi o único caso em que houve um pequeno tempo de embebição. Apesar da umidade inicial ter sido maior, a intensidade de precipitação foi menor do que a simulação 2 ($i = 120$ mm/h), o que pode explicar esse tempo de embebição. Mas essa mesma simulação 3 ($i = 84$ mm/h), que tem uma umidade inicial maior e uma precipitação de maior intensidade que a simulação 4 ($i = 60$ mm/h), teve um tempo maior para atingir o regime permanente. A possível explicação é que entre os interstícios dos blocos tenha havido uma pequena colmatação que tenha favorecido um maior escoamento superficial. As simulações 1, 2, 3 e 4 são vistas na Figura 6.10.

As simulações 5 ($i = 120$ mm/h) e 6 ($i = 84$ mm/h) sofreram a influência dos sedimentos trazidos pela chuva natural, o que reduziu o tempo de embebição e o tempo para se atingir

o regime permanente em relação as simulações 1, 2, 3 e 4. As simulações 5 e 6 podem ser vistas na Figura 6.12.

Os coeficientes de escoamento superficial foram dependentes das intensidades de precipitação, como se observa na Tabela 6.4. Os maiores coeficientes foram os que tiveram a maior intensidade de precipitação. Comparando com os valores dos coeficientes do BM 2%, percebe-se que eles foram maiores, mas quando se tem a colmatação da superfície, a declividade praticamente deixou de ter influência.

Os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.9 foram:

$$I_0 = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 31 \text{ mm/h}$$

$$K = 30 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,82$$

Os parâmetros da equação de Philip na Figura 6.9 foram:

$$S = 11 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 24,5 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,78$$

Esses parâmetros foram ajustados para a simulação 1 e representam os parâmetros da curva da capacidade de infiltração da superfície de BM 7%, pois não foi observado um tempo de embebição da superfície. Observa-se que o coeficiente R^2 mostra uma boa aderência aos dados observados tanto para Horton quanto para Philip.

Os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.11 foram:

$$I_0 = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 7 \text{ mm/h}$$

$$K = 80 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,90$$

Os parâmetros da equação de Philip na Figura 6.11 foram:

$$S = 4,5 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 3 \text{ mm/h}$$

R2 = 0,73

Esses parâmetros ajustados também foram da curva de capacidade de infiltração da superfície, devido à inexistência do tempo de embebição da superfície. Assim como no período seco, o coeficiente R2 mostra um bom ajuste tanto para Horton quanto para Philip.

6.1.3.2. Blocos maciços com a compactação da base

Essas superfícies semipermeáveis foram construídas a fim de avaliar o efeito da compactação da base na geração do escoamento superficial. Foram feitas simulações em duas superfícies, uma de declividade de 2% e outra de 6%.

Para a superfície de BMBC 2% (BMBC 2% = sigla de blocos maciços de declividade 2% com a base compactada) foi realizada uma simulação no dia 30/08/2004 com uma precipitação de intensidade 120 mm/h e duração de 30 minutos e outra no dia 01/09/2004 com intensidade de 84 mm/h e duração de 35 minutos. O intervalo sem chuva foi de 87 dias, compreendido de 03/06/2004 e 30/08/2004. A Figura 6.13 apresenta o hidrograma e a curva da taxa de infiltração para a simulação do dia 30/08/2004. A Figura 6.14 mostra o resumo de todas as simulações realizadas nos meses de agosto e setembro para a superfície de BMBC 2%.

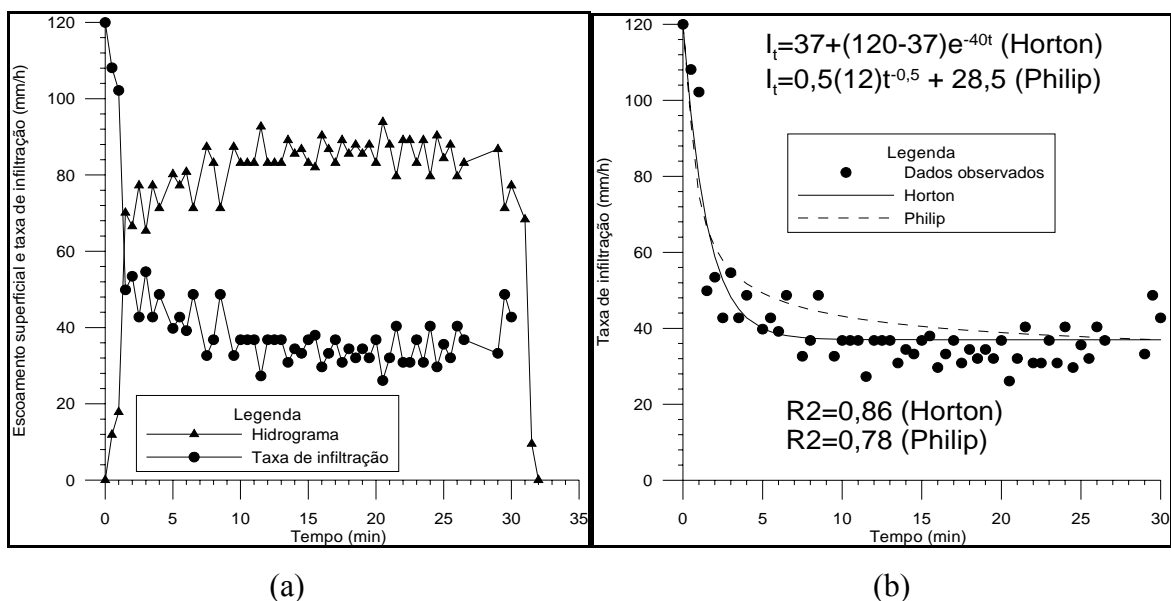
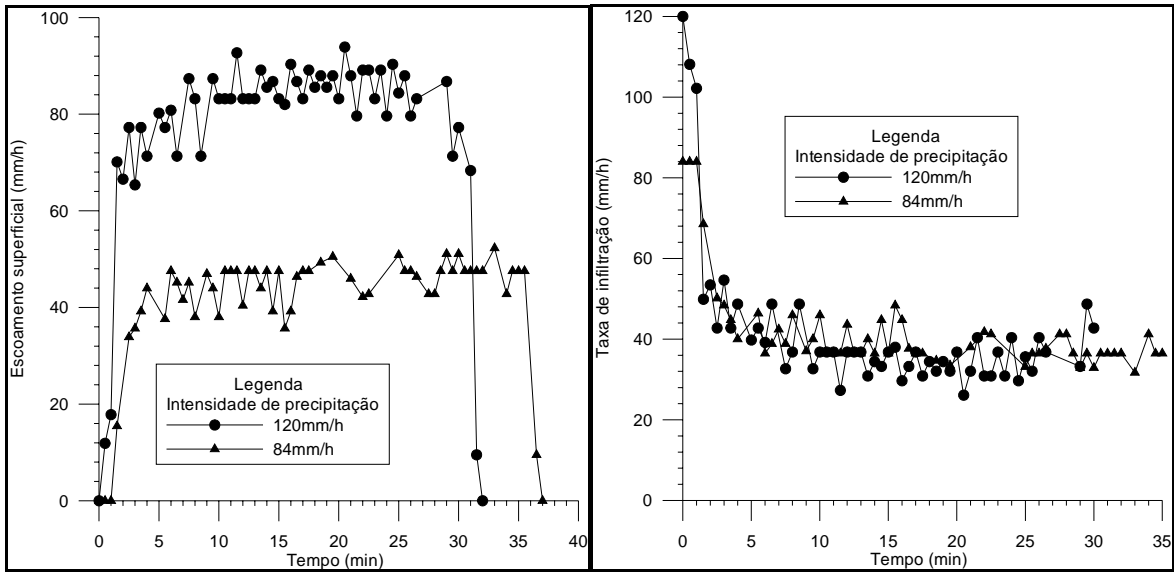
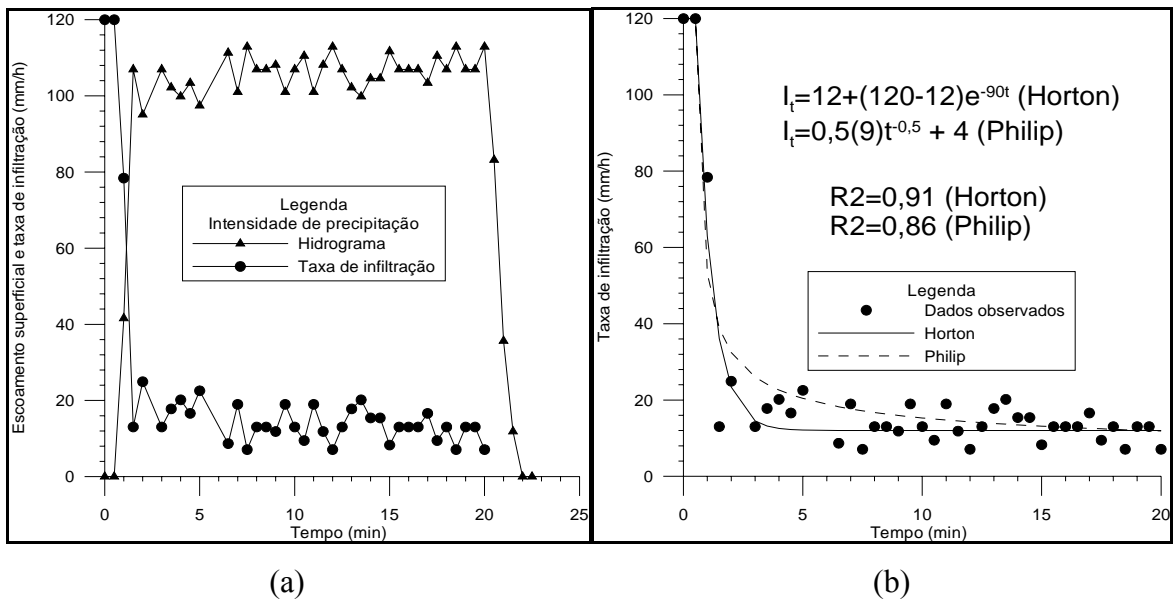


Figura 6.13 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

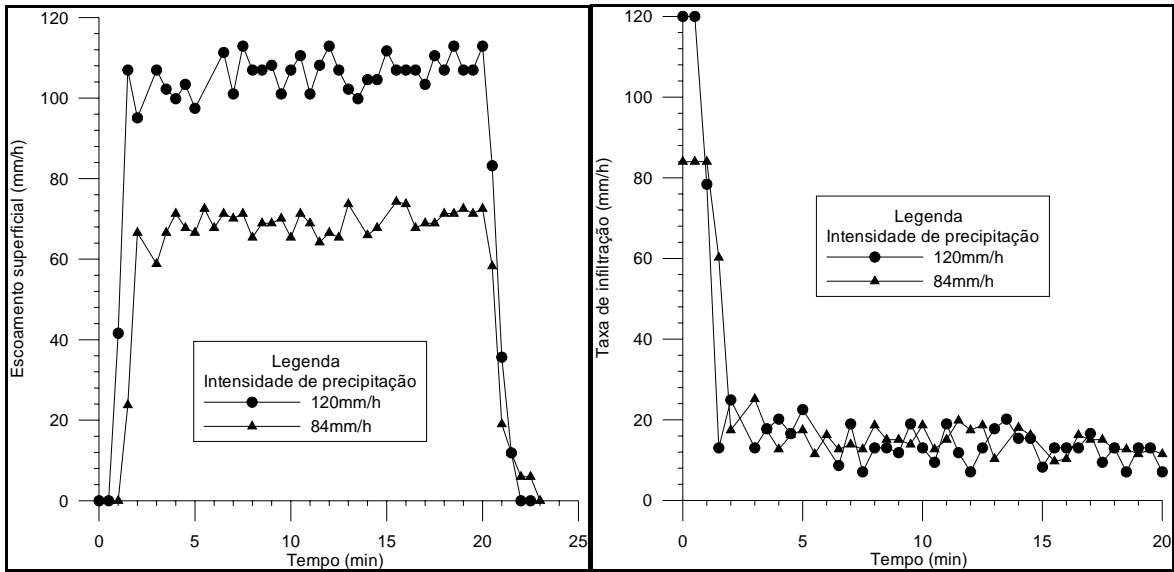


(a) (b)
 Figura 6.14 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BMBC 2%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BMBC 2%

Na Figura 6.15 são mostrados os resultados da simulação do dia 17/11/2004 para a parcela de BMBC 2%, que teve intensidade de precipitação de 120 mm/h e duração de 20 minutos. No dia 15/11/2004 foi o último dia de precipitação antes do ensaio da Simulação 3, e foi de 54 mm. Na Figura 6.16 são mostrados todos os ensaios realizados na parcela experimental de BMBC 2% para o mês de dezembro.



(a) (b)
 Figura 6.15 – Simulação 3 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados



(a) (b)
 Figura 6.16 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BMBC 2%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BMBC 2%

A Tabela 6.5 tem o resumo dos parâmetros das simulações para a parcela de BMBC 2%.

Tabela 6.5 – Resumo das simulações na parcela experimental de BMBC 2%

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
Data	30/08/2004	01/09/2004	17/11/2004	23/11/2004
t_c (s)	0	60	30	60
t_m (s)	450	240	90	120
t_u (s)	1800	2100	1200	1200
t_f (s)	1890	2190	1290	1350
i (mm/h)	120	84	120	84
V_{esc} (L)	41,63	25,91	35,11	22,24
V_{prec} (L)	60,05	49,04	40,03	28,02
i_c (mm/h)	37	36	12	13
C	0,69	0,53	0,88	0,79

Observando as Figuras de 6.25 a 6.32 e a Tabela 6.5 nota-se que os valores de taxa de infiltração foram menores para as simulações 3 e 4. Isso é explicado pela colmatação produzida pelos sedimentos trazidos pelas chuvas naturais e pela passagem de veículos. A

presença de sedimentos nas parcelas experimentais pode ser explicada pela construção dessas parcelas em uma área ainda pré-urbanizada.

Comparando os valores das taxas de infiltração para as simulações 1 e 2 com as taxas de infiltração para a superfície de BM 2%, percebe-se o efeito da compactação da base. Para a superfície de BMBC 2%, os tempos de embebição e de início do regime permanente foram menores do que os tempos para a superfície de base não compactada.

Os coeficientes de escoamento superficial sofreram influência das precipitações e da colmatação da superfície, sendo maiores para as precipitações de maior intensidade e que sofreram colmatação da superfície. Os coeficientes de escoamento para a parcela de BMBC 2% também foram maiores do que a parcela de BM 2% devido ao efeito da compactação da base.

Os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.13 foram:

$$I_0 = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 37 \text{ mm/h}$$

$$K = 40 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,86$$

Os parâmetros da equação de Philip na Figura 6.13 foram:

$$S = 12 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 28,5 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,78$$

Esses parâmetros ajustados são da curva de capacidade de infiltração da superfície, pois o tempo de embebição da superfície foi nulo. O ajuste foi realizado para a simulação 1, pois tem um coeficiente de escoamento maior que a simulação 2. O coeficiente de determinação R^2 mostra uma aderência aos dados observados tanto para Horton quanto para Philip.

Para a situação de colmatação da superfície e passagem de veículos, ocorreu uma situação incomum. Na simulação 3, em que se simulou a mesma intensidade de precipitação que na simulação 1, foi observada a ocorrência de tempo de embebição, enquanto na simulação 1 isso não ocorreu. A colmatação e a passagem de veículos não influenciaram no tempo de

embebição, mas reduziu o tempo para o escoamento atingir o regime permanente. Os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.15 foram:

$$I_o = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 12 \text{ mm/h}$$

$$K = 90 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,91$$

Os parâmetros da equação de Philip na Figura 6.15 foram:

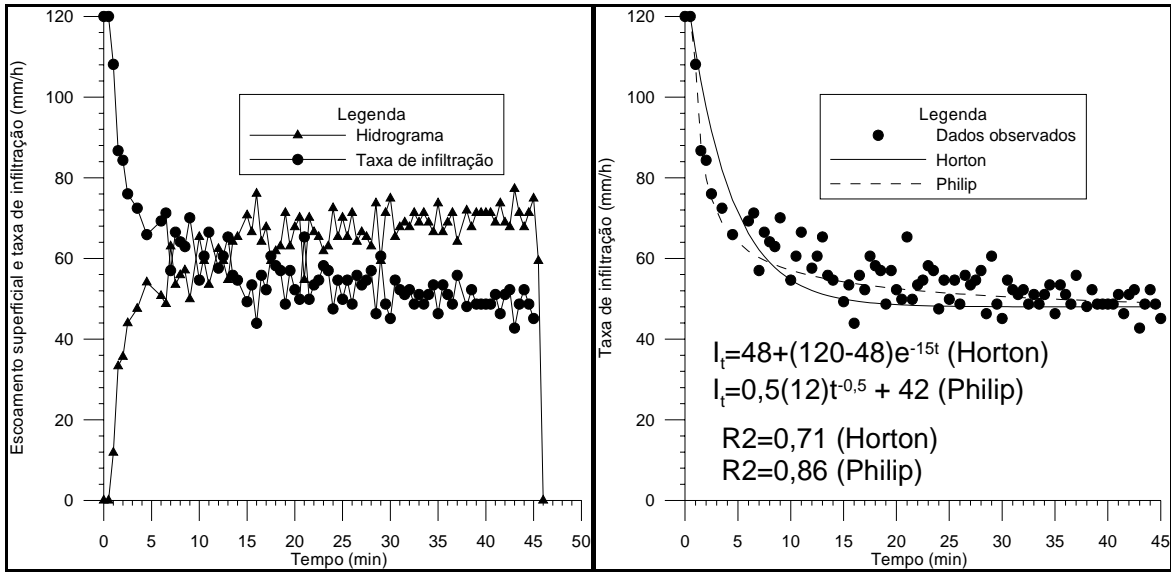
$$S = 9 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 4 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,86$$

Os parâmetros das equações de Horton e Philip só foram ajustados para o período após o tempo de embebição. Por isso, essas curvas não representam perfeitamente a curva de capacidade de infiltração da superfície. A simulação que apresentou o maior coeficiente de escoamento no mês de novembro foi a 3, a qual foi utilizada para o ajuste dos parâmetros das equações de Horton e Philip. Os coeficientes de determinação R^2 tiveram um bom ajuste tanto para Horton quanto para Philip.

Para a parcela de BMBC 6% (BMBC 6% = sigla de blocos maciços de declividade 6% com a base compactada) foram feitas seis simulações. Deve-se lembrar que houve uma precipitação de 5,6 mm no dia 03/06/2004, só voltando a chover novamente no dia 09/10/2004. Na Figuras 6.17 são mostrados o hidrograma e a taxa de infiltração para a simulação do dia 28/09/2004, com uma precipitação de 84 mm/h e duração de 33 minutos.

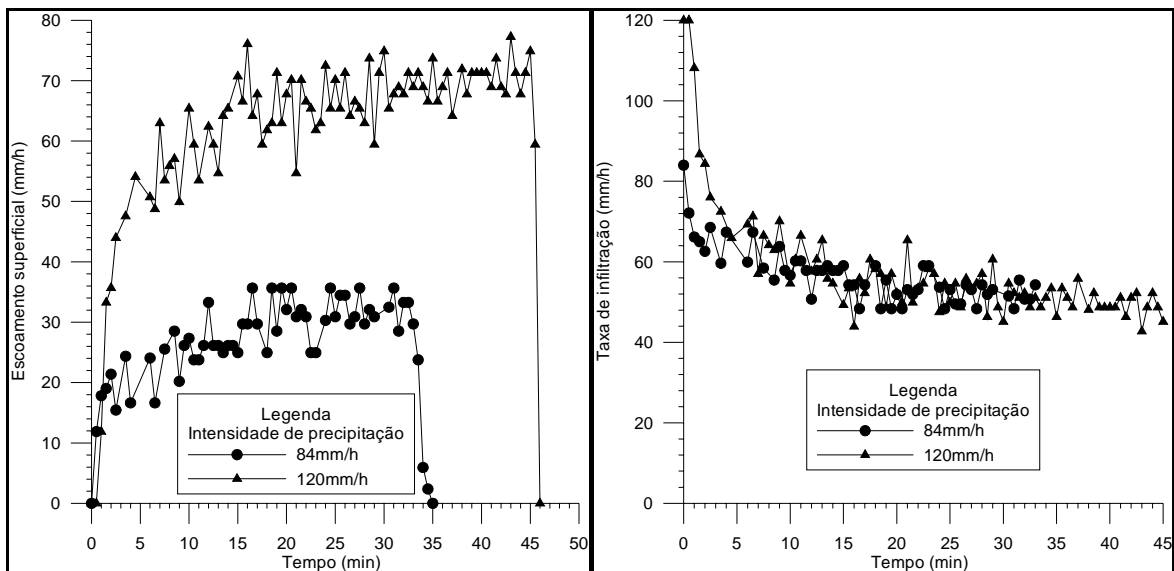


(a)

(b)

Figura 6.17 – Simulação 2 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

A Figura 6.18 mostra os hidrogramas e curvas das taxas de infiltração de todas as simulações do mês de setembro realizadas no BMBC 6%.



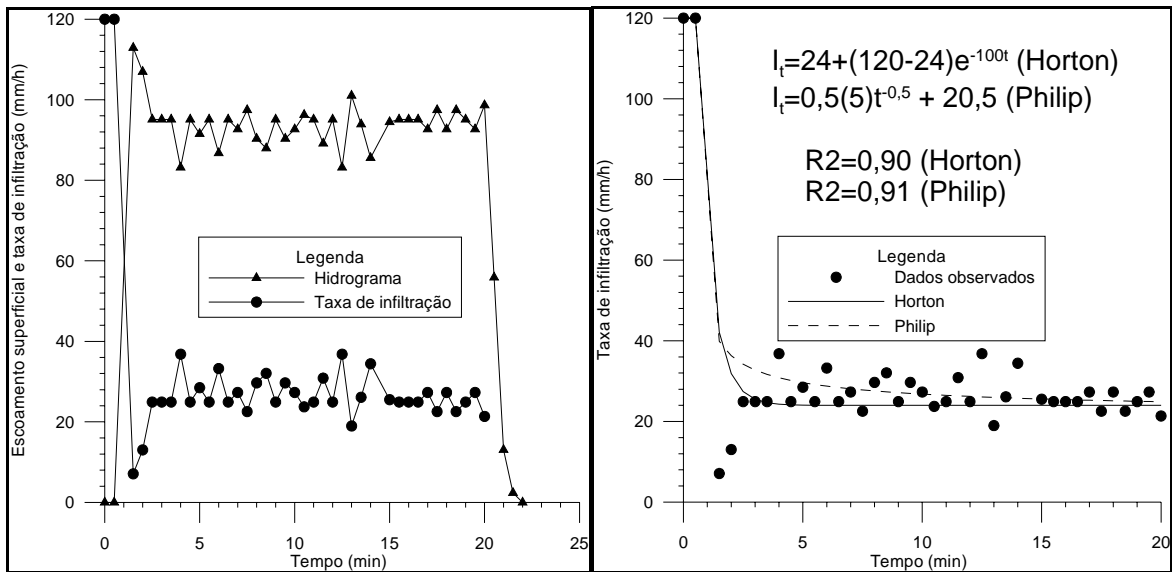
(a)

(b)

Figura 6.18 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BMBC 6%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BMBC 6%

A Figura 6.19 apresenta os resultados do ensaio realizado no dia 29/11/2004 na superfície de BMBC 6%, que teve intensidade de precipitação de 120 mm/h e duração de 20 minutos.

Entre os dias 13/11/2004 e 29/11/2004 choveu um total de 105,5 mm, mostrando que o solo da parcela experimental estava aparentemente úmido.

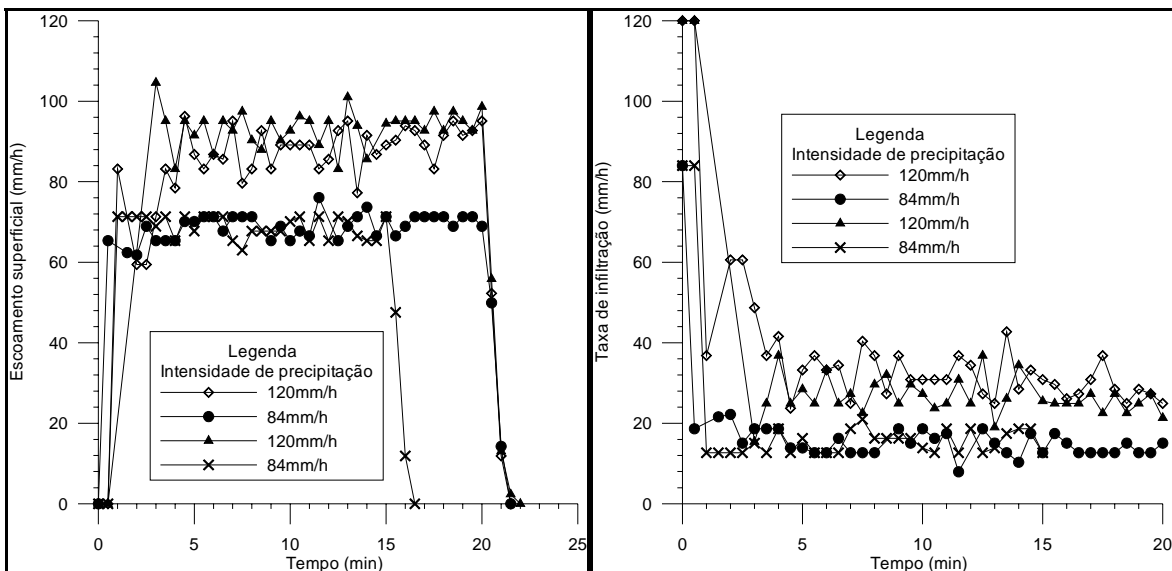


(a)

(b)

Figura 6.19 – Simulação 5 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

Para o mês de novembro foram realizadas quatro simulações, que são apresentadas na Figura 6.20.



(a)

(b)

Figura 6.20 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BMBC 6%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BMBC 6%

O resumo dos parâmetros para as simulações feitas nos meses de setembro e novembro é mostrado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Resumo dos parâmetros das simulações na parcela de BMBC 6%

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5	Simulação 6
Data	03/09/2004	28/09/2004	17/11/2004	23/11/2004	29/11/2004	29/11/2004
t_e (s)	0	30	30	0	30	30
t_m (s)	990	900	270	270	90	60
t_u (s)	1980	2700	1200	1200	1200	900
t_f (s)	2070	2730	1260	1260	1290	960
i (mm/h)	84	120	120	84	120	84
V_{esc} (L)	15,67	47,64	28,36	23,37	31,36	17,13
V_{prec} (L)	46,24	90,07	40,03	28,02	40,03	21,02
i_c (mm/h)	52	48	28	14	24	15
C	0,34	0,53	0,71	0,83	0,78	0,81

Analisando os parâmetros das simulações 1 e 2 observou-se que os tempos de embebição e de início do regime permanente foram diferentes. O tempo de início do regime permanente foi um pouco menor na simulação 2 devido a maior intensidade de precipitação, que saturou a superfície. O coeficiente de escoamento foi maior para a simulação 2, com maior intensidade de precipitação.

Um fato interessante que aconteceu foi que essa superfície teve um menor escoamento que as superfícies de BM 7% e de BMBC 2%. Os tempos de embebição e de início do regime permanente para a superfície de BMBC 6% foram menores do que as superfícies anteriormente citadas, assim como o coeficiente de escoamento superficial.

Na Tabela 6.6 observa-se que a infiltração de base foi maior que as superfícies de BM 7% e de BMBC 2%. Possivelmente, por a estrutura interna do solo da parcela de BMBC 6% ser heterogênea e apresentar um rearranjo de grãos diferentes das parcelas de BM 7% e BMBC 2%, isso tenha resultado em valores maiores do que o esperado para a infiltração de base.

Para as simulações do mês de novembro, observou-se que as infiltrações de base foram semelhantes para as precipitações de mesma intensidade. Possivelmente, por a estrutura

interna do solo da parcela de BMBC 6% ser heterogênea e apresentar um rearranjo de grãos diferentes das parcelas de BM 7% e BMBC 2%, tenham resultado em valores maiores do que o esperado para a infiltração de base. A simulação 6, por exemplo, que teve uma condição inicial de umidade alta por ter sido feito no mesmo dia da simulação 5, teve o valor de infiltração de base igual ao da simulação 4.

Os coeficientes de escoamento para as simulações do mês de novembro foram maiores para as precipitações de menor intensidade. A condição inicial de umidade da parcela aliada com a estrutura interna no solo pode ter influenciado nesses valores de coeficiente de escoamento.

No ajuste dos parâmetros dos modelos de infiltração de Horton e Philip enfrentou-se a dificuldade de se definir a infiltração inicial, pois para as simulações 1 e 4 foi observado tempo de embebição nulo. Isso não aconteceu para as simulações 2 e 5, que tinham maiores intensidades de precipitações. Devido a esta incerteza, resolveu-se adotar as simulações 2 e 4 para esse ajuste, pois foram as que mais produziram escoamento superficial.

Os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.17 foram:

$$I_0 = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 48 \text{ mm/h}$$

$$K = 15 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,71$$

Os parâmetros da equação de Philip na Figura 6.17 foram:

$$S = 12 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 42 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,86$$

Essas equações de Horton e Philip não representam a curva de capacidade de infiltração da superfície, pois foi observado um pequeno tempo de embebição. Por isso o ajuste só foi possível depois que a superfície se encontrava saturada. Para esse ajuste foi adotada a simulação 2, pois a mesma teve um coeficiente de escoamento maior que a simulação 1 e

uma menor infiltração de base. Observou-se que o coeficiente R2 mostra um melhor ajuste para Philip em relação a Horton.

Os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.19 foram:

$$I_0 = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 24 \text{ mm/h}$$

$$K = 100 \text{ h}^{-1}$$

$$R2 = 0,90$$

Os parâmetros da equação de Philip na Figura 6.19 foram:

$$S = 5 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 20,5 \text{ mm/h}$$

$$R2 = 0,91$$

Para o ajuste foi tomada a simulação 5, pois apesar da simulação 4 ter um maior coeficiente de escoamento, ela apresentou valores semelhantes aos da simulação 6. A simulação 6 teve uma condição inicial de umidade diferente, já que foi realizada depois da simulação 5. No caso da superfície ter sido colmatada e ter recebido tráfego de veículos, os coeficientes de determinação R2 foram praticamente iguais para Philip e Horton.

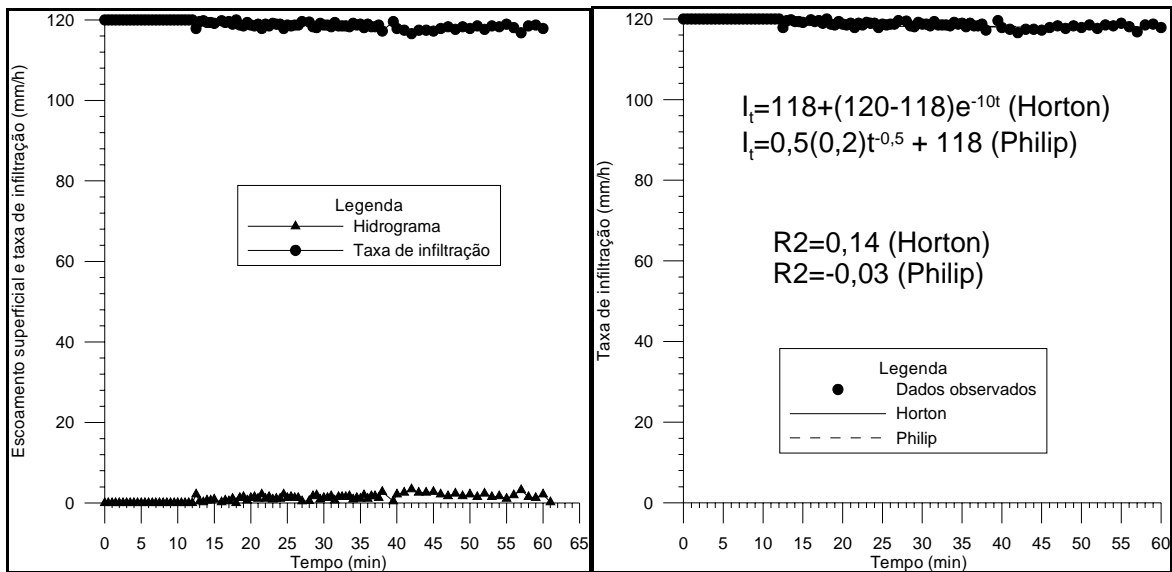
Para a situação em que houve colmatação e passagem de veículos sobre a superfície, nota-se que as equações de Horton e Philip representam a curva de capacidade de infiltração da superfície, já que o tempo de embebição foi nulo. Isso quer dizer que a intensidade de chuva estava maior que a capacidade de infiltração da superfície permeável.

6.1.4. Blocos vazados

6.1.4.1. Blocos vazados sem a compactação de base

A característica desses tipos de superfícies é apresentarem uma taxa final de infiltração maior do que a das superfícies construídas com blocos maciços. Em geral, isso foi observado em todos os ensaios realizados, como será apresentado a seguir.

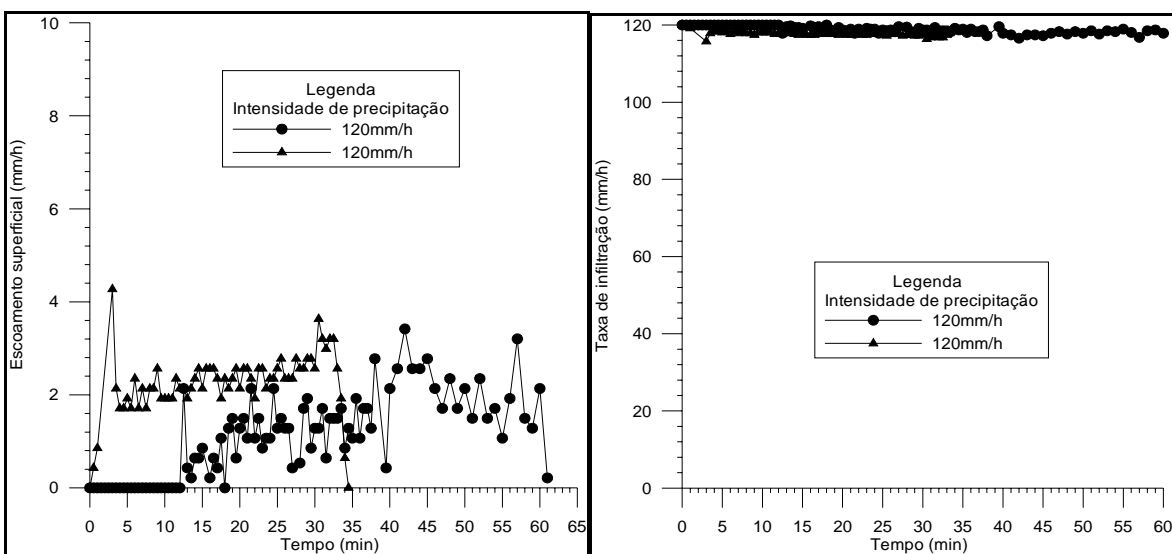
Para a superfície de BV 2% (BV 2% = sigla de blocos vazados de declividade 2% sem a base compactada) foram feitas cinco simulações. O primeiro ensaio foi no dia 12/08/2004, com intensidade de precipitação de 120 mm/h e duração de 60 minutos. Deve-se lembrar que houve um período de 69 dias sem chuva. A Figura 6.21 mostra o hidrograma e a curva de infiltração para o respectivo experimento. A Figura 6.22 tem o detalhe de todas as simulações feitas no BV 2% durante o mês de agosto.



(a)

(b)

Figura 6.21 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

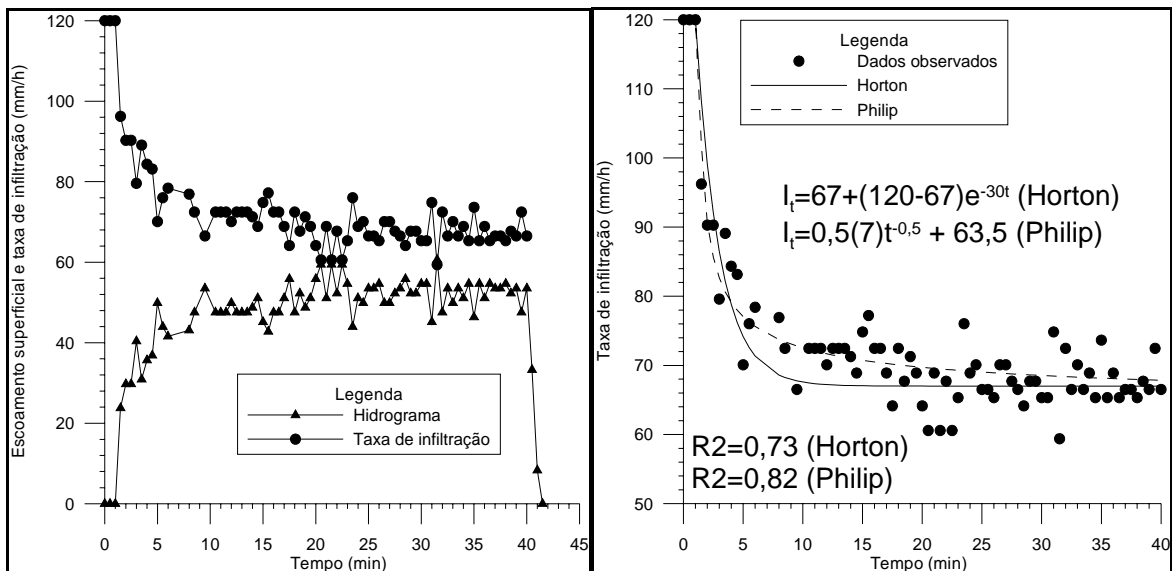


(a)

(b)

Figura 6.22 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BV 2%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BV 2%

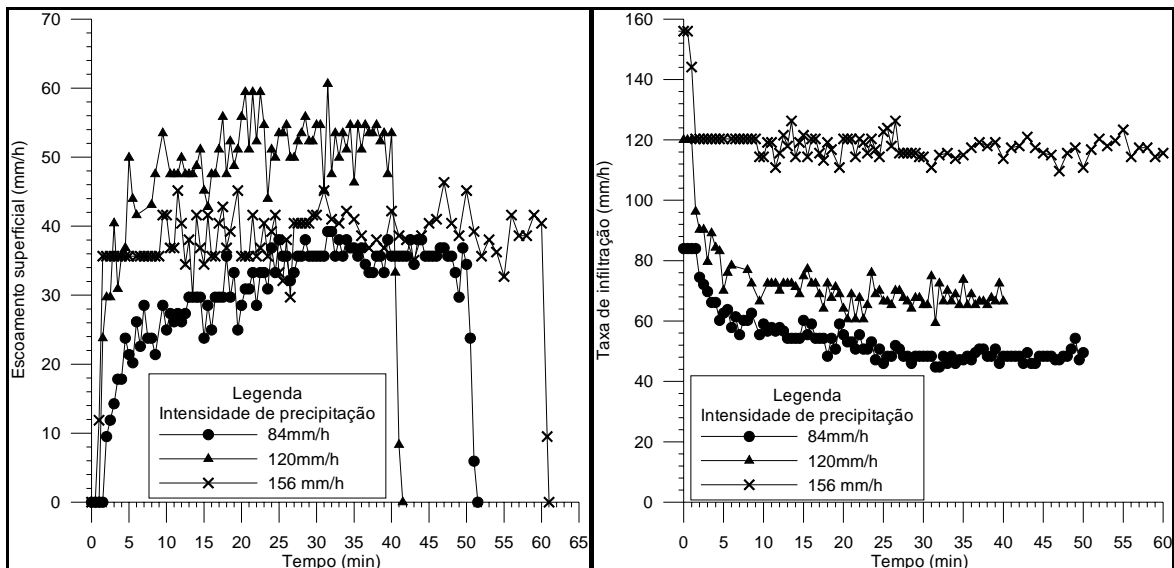
A Figura 6.23 mostra o hidrograma e a curva da taxa de infiltração para o ensaio do dia 09/12/2004, que teve intensidade de 120 mm/h e duração de 40 minutos. Entre os dias 30/11/2004 e 09/12/2004 a chuva total foi de 79 mm, que mostra que o solo da parcela estava aparentemente úmido. A Figura 6.24 tem o detalhe de todas as simulações na superfície de BV 2% realizadas no mês de dezembro.



(a)

(b)

Figura 6.23 – Simulação 5 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados



(a)

(b)

Figura 6.24 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BV 2%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BV 2%

O resumo de todos os parâmetros das simulações feitas na superfície de BV 2% pode ser visto na Tabela 6.7

Tabela 6.7 – Resumo das simulações da parcela de BV 2%

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5
Data	12/08/2004	23/08/2004	01/12/2004	07/12/2004	09/12/2004
t_e (s)	720	0	30	90	60
t_m (s)	750	180	570	1440	570
t_u (s)	3600	1980	3600	3000	2400
t_f (s)	3660	2040	3645	3060	2460
i (mm/h)	120	120	156	84	120
V_{esc} (L)	0,89	1,35	38,23	25,70	32,24
V_{prec} (L)	120,10	66,05	156,12	70,06	80,06
i_c (mm/h)	118	117	117	49	67
C	0,0074	0,020	0,24	0,37	0,40

Observando a Figura 6.22 e os parâmetros das simulações 1 e 2 percebe-se o alto valor de infiltração de base, o que mostra a eficiência dessa superfície no controle do escoamento superficial. A demora para se atingir os tempos de embebição e de regime permanente aliado à baixa taxa de infiltração resultaram em um baixo coeficiente de escoamento.

A simulação 3, apesar de ter sido realizado no mês de dezembro, não tinha sofrido a colmatação da superfície. Essa colmatação veio de uma chuva natural que aconteceu no mesmo dia da simulação 3 e que veio a mudar os parâmetros de escoamento e infiltração para as simulações 4 e 5.

O coeficiente de escoamento para a simulação 3 foi maior que as simulações 1 e 2 devido a maior intensidade de precipitação. O alto coeficiente de escoamento de escoamento para as simulações 4 e 5, mesmo com precipitações inferiores a simulação 3 foi devido a colmatação da superfície. A inexistência do tempo de embebição da simulação 2 fez com que o coeficiente de escoamento fosse 170% maior do que o observado para a simulação 1.

Os parâmetros ajustados para a equação de Horton para a simulação 3 ($i = 156$ mm/h) foram:

$$I_0 = 156 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 117 \text{ mm/h}$$

$$K = 30 \text{ h}^{-1}$$

$$R2 = 0,43$$

Os parâmetros da equação de Philip para a simulação 3 ($i = 156 \text{ mm/h}$) foram:

$$S = 6 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 114,5 \text{ mm/h}$$

$$R2 = 0,32$$

Esses parâmetros foram ajustados para a simulação 3, já que a mesma não tinha sofrido ainda os efeitos da colmatação por sedimentos. Observa-se que o ajuste se deu a partir do tempo de embebição, que foi de 30 segundos. O ajuste do coeficiente R2 não foi bom tanto para Horton quanto para Philip.

Para o mês de dezembro, período em que começavam as primeiras chuvas na região, os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.23 foram:

$$I_0 = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 67 \text{ mm/h}$$

$$K = 30 \text{ h}^{-1}$$

$$R2 = 0,73$$

Os parâmetros da equação de Philip na Figura 6.23 foram:

$$S = 7 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 63,5 \text{ mm/h}$$

$$R2 = 0,82$$

Os parâmetros obtidos foram ajustados a partir dos dados da simulação 4 pois foi a que apresentou o maior coeficiente de escoamento. O tempo de embebição foi de 60 segundos para essa simulação. No caso de colmatação da superfície, o coeficiente R2 mostra que a aderência de Horton aos dados observados não foi satisfatória, ao passo que foi aceitável para Philip.

Há também as superfícies de BV 7% (BV 7% = sigla de blocos vazados de declividade 7% sem a base compactada), onde foram feitas cinco simulações. Dessas, duas foram no mês de agosto e três no mês de dezembro.

A Figura 6.25 mostra o resultado do ensaio realizado no dia 12/08/2004 para a respectiva superfície, onde foi simulada uma precipitação de 120 mm/h durante 40 minutos. Entre o último dia de chuva medido e o dia do primeiro ensaio foi um intervalo de 69 dias, comprovando que o solo provavelmente estava com uma umidade baixa. Na Figura 6.26 tem-se os hidrogramas e curvas de taxas de infiltração de todos os ensaios na superfície de BV 7% para o mês de agosto.

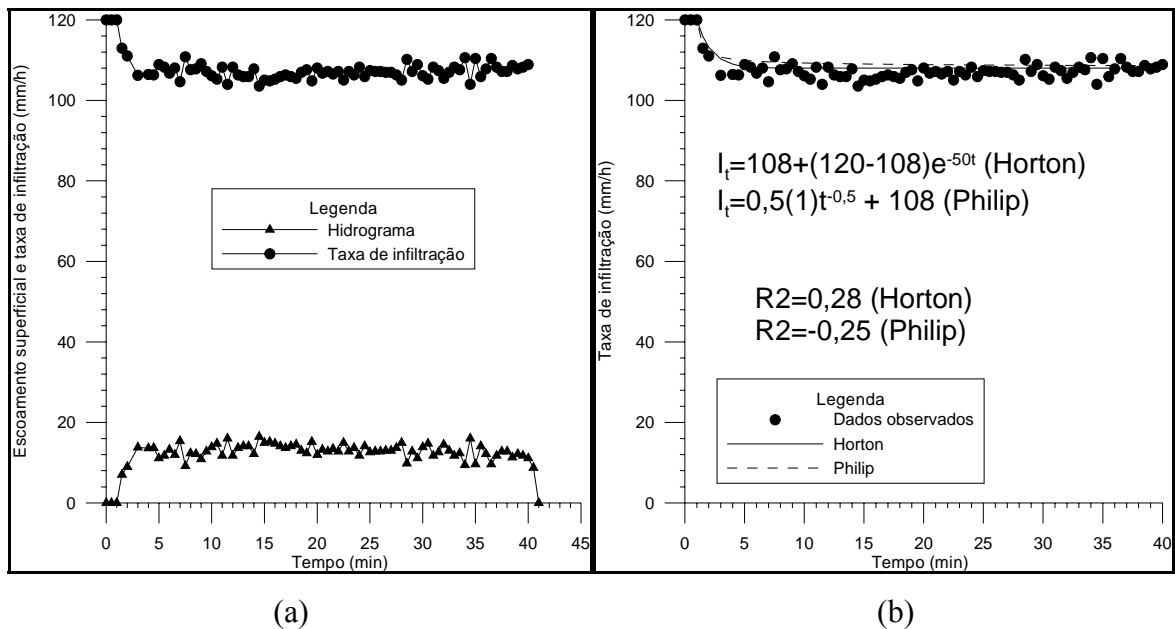
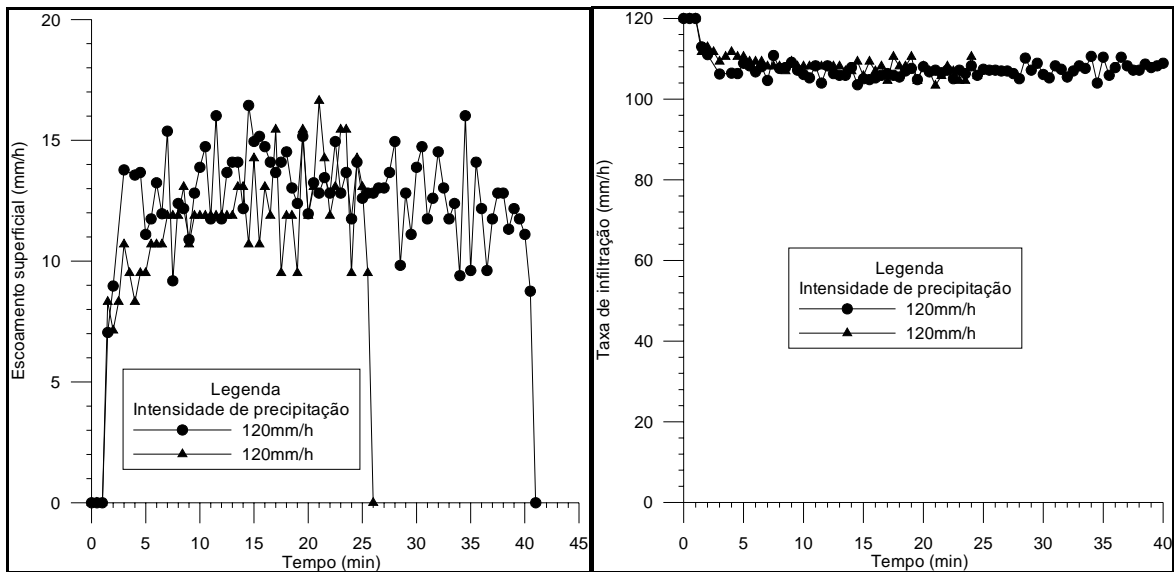


Figura 6.25 – Simulação 1 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

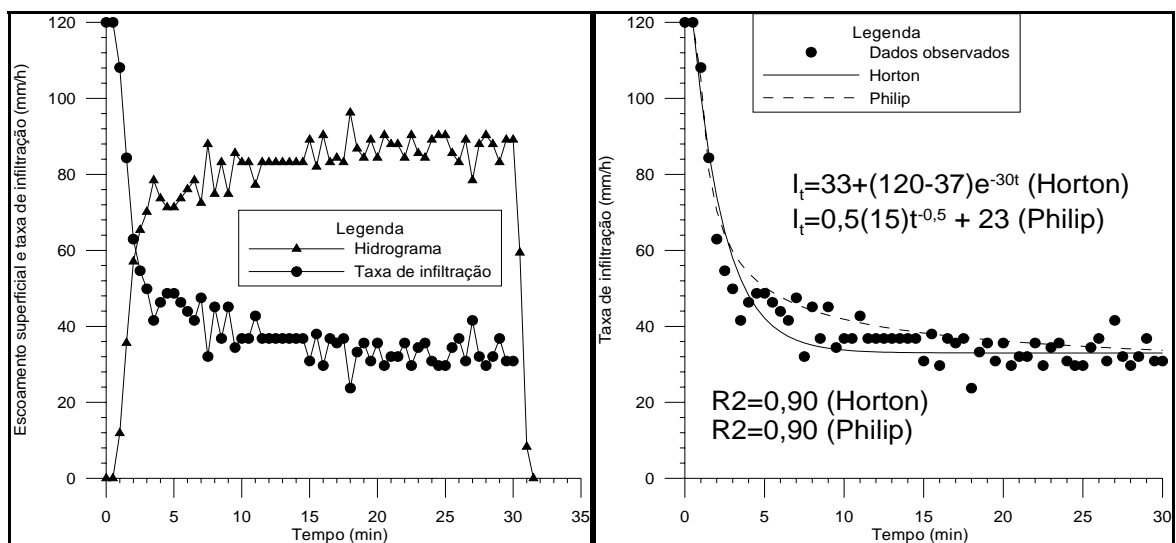


(a)

(b)

Figura 6.26 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BV 7%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BV 7%

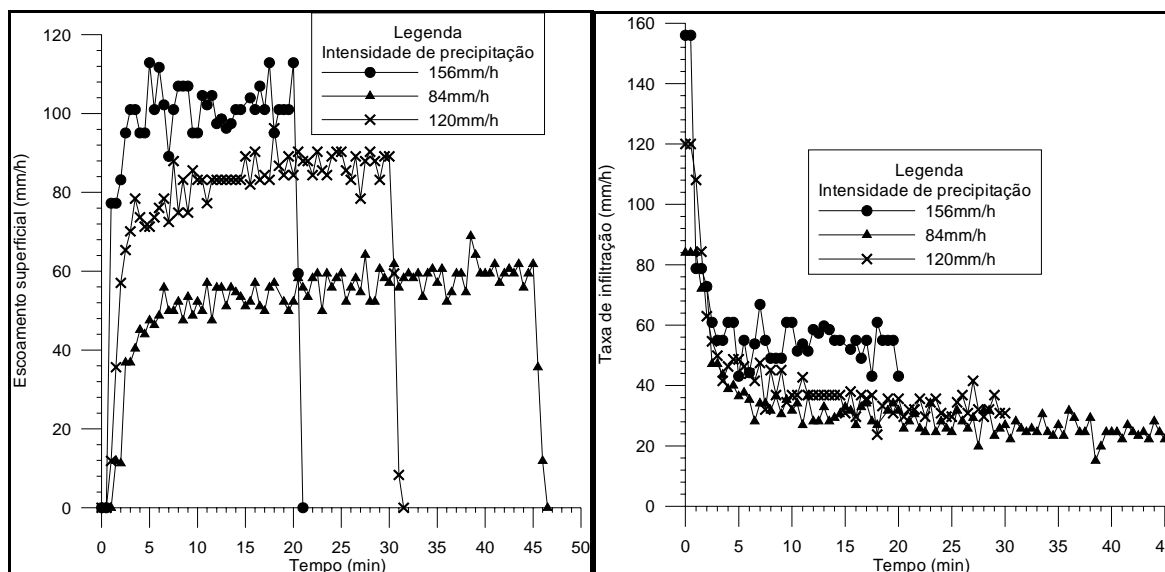
A Figura 6.27 mostra o escoamento superficial e a taxa de infiltração para o experimento do dia 09/12/2004, que teve intensidade de 120 mm/h e duração de 30 minutos. Entre os dias 30/11/2004 e 09/12/2004 a chuva total foi de 79 mm, indicando que o solo estava úmido. A Figura 6.28 apresenta os resultados das simulações no mês de dezembro, período em que já se teve início o período de chuvas e conseqüentemente o aumento da umidade do solo.



(a)

(b)

Figura 6.27 – Simulação 5 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados



(a) (b)
 Figura 6.28 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BV 7%; (b) Curvas das taxas de infiltração da superfície do BV 7%

A Tabela 6.8 tem o resumo dos parâmetros das simulações feitas na superfície de BV 7%.

Tabela 6.8 – Resumo das simulações da parcela de BV 7%

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5
Data	12/08/2004	23/08/2004	01/12/2004	07/12/2004	09/12/2004
t_e (s)	60	60	30	60	30
t_m (s)	180	420	180	1740	570
t_u (s)	2400	1500	1200	2700	1800
t_f (s)	2430	1530	1230	2760	1860
i (mm/h)	120	120	156	84	120
V_{esc} (L)	8,43	4,80	32,98	40,06	40,28
V_{prec} (L)	80,06	50,04	52,04	63,05	60,05
i_c (mm/h)	108	106	52	24	33
C	0,10	0,096	0,63	0,63	0,67

Observando as simulações 1 e 2 e comparando-as com as simulações 1 e 2 da parcela de BV 2%, conclui-se que o aumento da declividade contribuiu para aumentar o escoamento superficial.

A colmatação da superfície fez com que os coeficientes de escoamento aumentassem, da ordem de 0,10 para 0,65. Na simulação 3, que teve intensidade de precipitação de 156 mm/h, o coeficiente de escoamento foi o mesmo da simulação 4, que teve intensidade de precipitação de 84 mm/h, comprovando o efeito da colmatação.

Quanto à infiltração de base, ela diminuiu significativamente da simulação 1 e 2 para a simulação 3. Isso foi devido as chuvas naturais que traziam sedimentos para a parcela experimental. No dia 01/12/2004 ocorreu uma chuva de forte intensidade, que acabou por colmatar ainda mais a parcela. Isso pode ser comprovado nos dois ensaios finais, onde a taxa final de infiltração caiu de 50 mm/h para 30 mm/h.

Os parâmetros ajustados para a equação de Horton na simulação 1 a partir do tempo de embebição foram:

$$I_o = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 108 \text{ mm/h}$$

$$K = 50 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,28$$

Os parâmetros para a equação de Philip na na simulação 1 a partir do tempo de embebição foram:

$$S = 1 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 108 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = -0,25$$

Para os ensaios da superfície de BV 7% o coeficiente de determinação R^2 mostrou que não houve um bom ajuste de Horton e Philip aos dados observados.

Para as simulações do mês de dezembro, os parâmetros de Horton que foram ajustados na Figura 6.27 foram:

$$I_o = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 33 \text{ mm/h}$$

$$K = 30 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,90$$

Os parâmetros ajustados da equação de Philip na Figura 6.27 foram:

$$S = 15 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 23 \text{ mm/h}$$

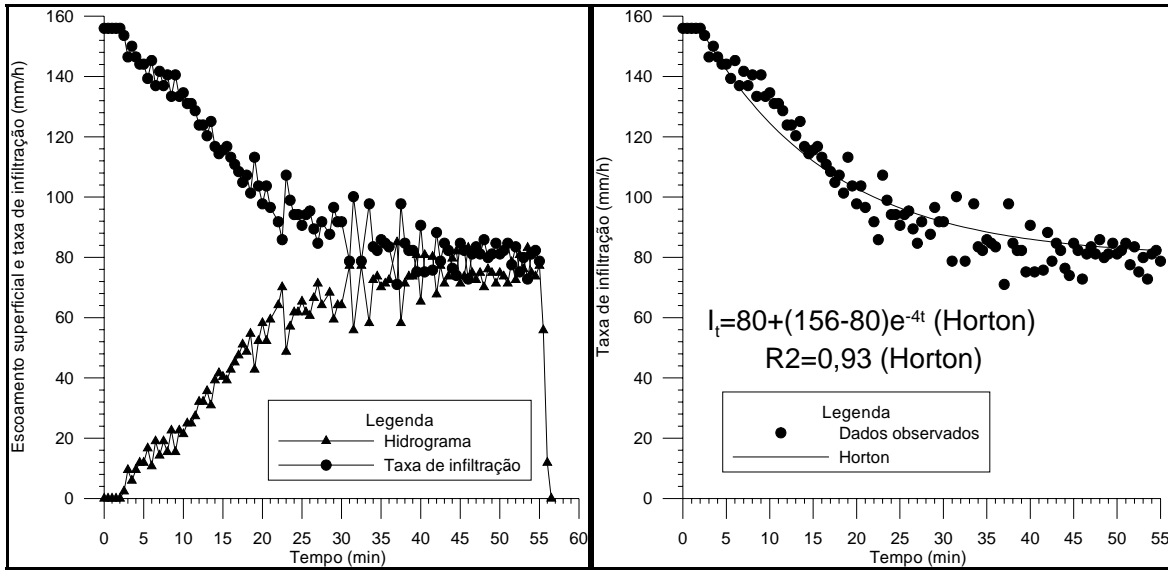
$$R^2 = 0,90$$

O ajuste nesse caso só teve início a partir de 30 segundos, tempo esse que a superfície levou para saturar. No caso em a superfície se encontrava colmatada, tanto os coeficientes de determinação R^2 para Horton e Philip tiveram um bom ajuste.

6.1.4.2. Blocos vazados com a compactação de base

Para esse tipo de superfície foram estudadas duas declividades diferentes, a primeira sendo de 2% e a segunda de 6%. Foram simuladas precipitações de 156 mm/h, 120 mm/h e 84 mm/h.

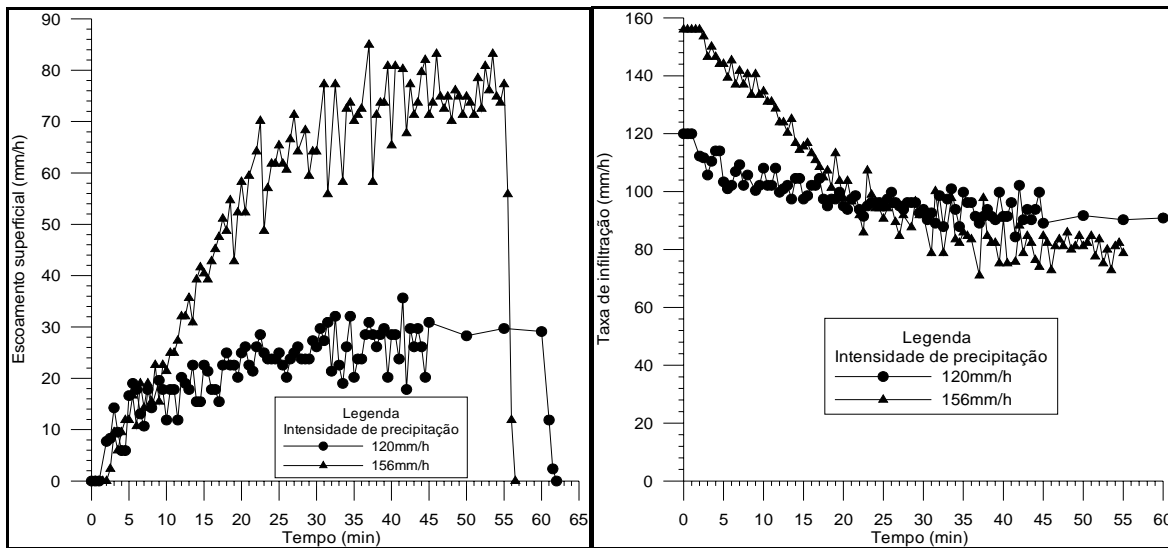
Para a superfície de BVBC 2% (BVBC 2% = sigla de blocos vazados de declividade 2% com a base compactada) foram feitas quatro simulações, sendo duas no mês de setembro e duas no mês de novembro. Na Figura 6.29 é apresentado o hidrograma e a curva da taxa de infiltração do dia 08/09/2004, que teve uma precipitação de 156 mm/h de intensidade e 55 minutos de duração. Do último dia de chuva medido até o dia do primeiro ensaio foram 90 dias. A Figura 6.30 apresenta o resumo de todos os ensaios realizados para a superfície de BVBC 2% no mês de setembro.



(a)

(b)

Figura 6.29 – Simulação 2 ($i = 156 \text{ mm/h}$; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual da equação de Horton aos dados observados

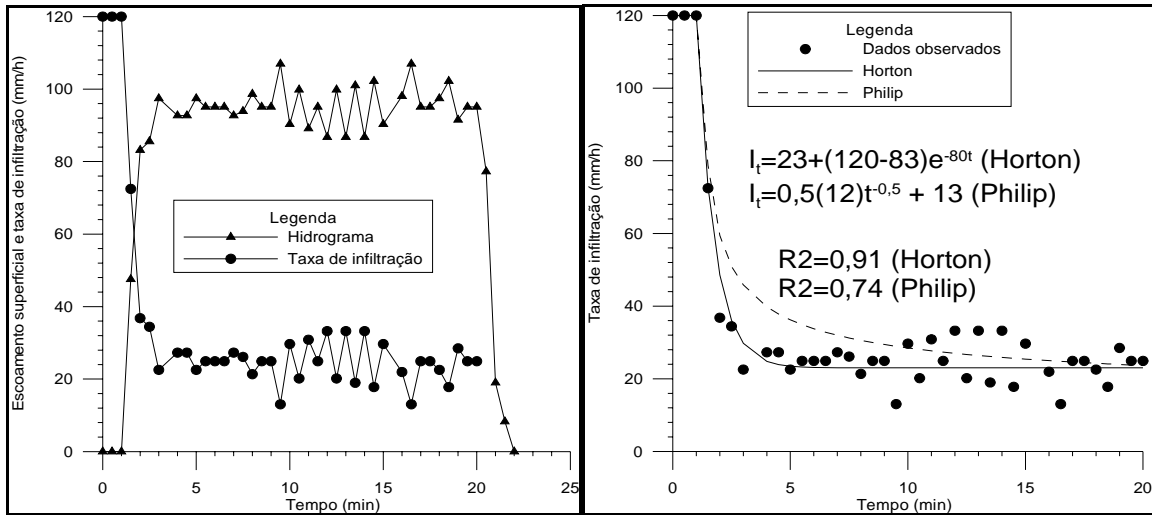


(a)

(b)

Figura 6.30 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BVBC 2%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BVBC 2%

Na Figura 6.31 são apresentados o hidrograma e a curva da taxa de infiltração para o dia 17/11/2004. Entre os dias 08/11/2004 e 15/11/2004 houve uma chuva total de 69,5 mm, que aumentou a umidade do solo. A precipitação teve uma intensidade de 120 mm/h e duração de 20 minutos. Também é apresentado o ajuste dos parâmetros da equação de Horton aos dados de infiltração observados.

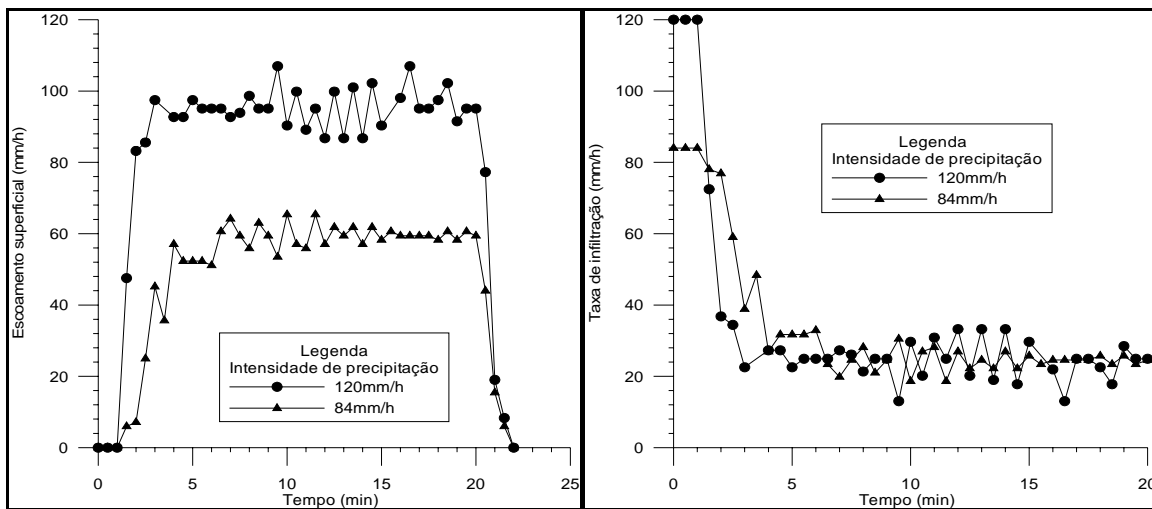


(a)

(b)

Figura 6.31 – Simulação 3 ($i = 120$ mm/h; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

Na Figura 6.32 tem-se as simulações realizadas na parcela de BVBC 2% para o mês de novembro.



(a)

(b)

Figura 6.32 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BVBC 2%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BVBC 2%

O resumo dos parâmetros das simulações na parcela de BVBC 2% são mostrados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Resumo das simulações na superfície de BVBC 2%

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
Data	03/09/2004	08/09/2004	17/11/2004	23/11/2004
t_e (s)	60	120	60	60
t_m (s)	2070	2040	180	390
t_u (s)	3000	3300	1200	1200
t_f (s)	3120	3360	1290	1290
i (mm/h)	156	156	120	84
V_{esc} (L)	40,31	50,57	30,53	17,68
V_{prec} (L)	130,10	143,11	40,03	28,02
i_c (mm/h)	85	80	23	24
C	0,31	0,35	0,76	0,63

Para as simulações 1 e 2, que possuíam a mesma intensidade de precipitação, observou-se que os parâmetros de tempo de embebição e entrada no regime permanente foram bem semelhantes. Isso refletiu nos valores de infiltração de base, como pode ser visto na Tabela 6.9. A pequena diferença no coeficiente de escoamento superficial da simulação 2 em relação à simulação 1 pode ser explicada pela maior duração da precipitação.

Os coeficientes de escoamento da parcela de BVBC 2% foram maiores do que os observados para as parcelas de BV 2%, devido ao efeito da compactação da base. Os valores dos coeficientes de escoamento para as simulações 3 e 4, onde se verificava a colmatação da superfície, foram maiores do que as simulações para a parcela de 2%. É bem provável que a colmatação na parcela de BV 2% tenha sido menor.

Com o início das primeiras chuvas no fim do mês de outubro, foram carreados sedimentos para a parcela que acabaram por colmatá-la, juntamente com o efeito da passagem dos veículos. Os resultados das simulações 3 e 4 mostram justamente isso. Os tempos de embebição da superfície e início do regime permanente diminuíram em relação às simulações 1 e 2, que junto com a diminuição da taxa final de infiltração resultaram em um maior coeficiente de escoamento.

Os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.29 foram:

$$I_0 = 156 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 80 \text{ mm/h}$$

$$K = 4 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,93$$

Especificamente nesse caso não foi possível o ajuste pela equação de Philip aos dados observados, pois ela não consegue ajustar corretamente o decréscimo da taxa de infiltração com o tempo. O coeficiente de determinação R^2 mostrou que Horton teve uma boa aderência aos dados observados.

Para os ensaios no mês de novembro, os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.31 foram:

$$I_o = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 23 \text{ mm/h}$$

$$K = 80 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,91$$

Os parâmetros ajustados da equação de Philip na Figura 6.31 foram:

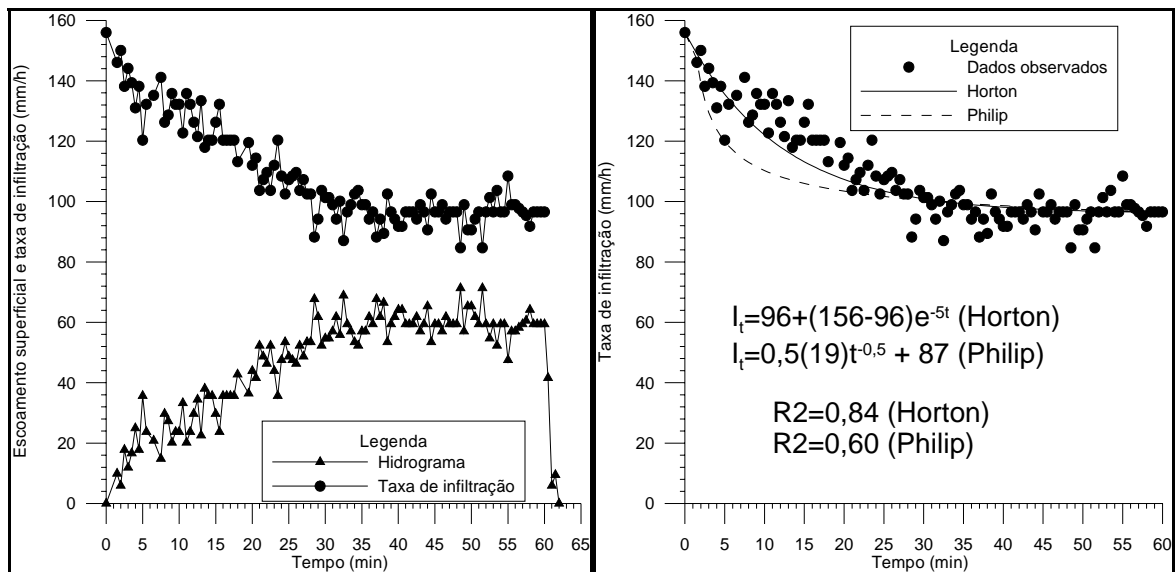
$$S = 12 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 13 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,74$$

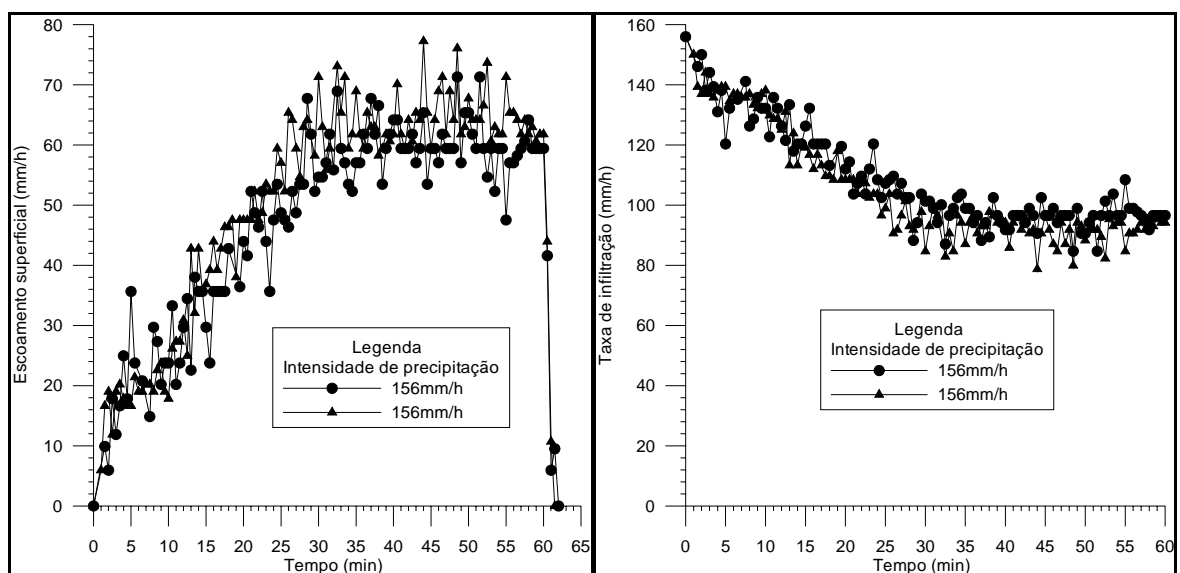
Nos ajustes dos parâmetros tanto para simulação 2 quanto a 3 observa-se a ocorrência de um tempo de embebição. Isso fez com que o ajuste só tenha início a partir desse tempo de embebição, que indica que a superfície do solo está saturada. O coeficiente R^2 mostra uma melhor aderência de Horton do que Philip aos dados observados.

Para a parcela de BVBC 6 % (BVBC 6% = sigla de blocos vazados de declividade 6% com base compactada) foram realizados quatro experimentos no total, sendo dois no mês de setembro, um no mês de novembro e um no mês de dezembro. As intensidades de precipitação simuladas foram de 156 mm/h, 120 mm/h e 84 mm/h. A Figura 6.33 mostra um experimento feito no dia 08/09/2004, com duração de 60 minutos e precipitação de 156 mm/h. Entre o primeiro dia de ensaio nessa superfície e o último dia de chuva medido foi um intervalo de 95 dias, mostrando que o solo da parcela tinha uma baixa umidade.



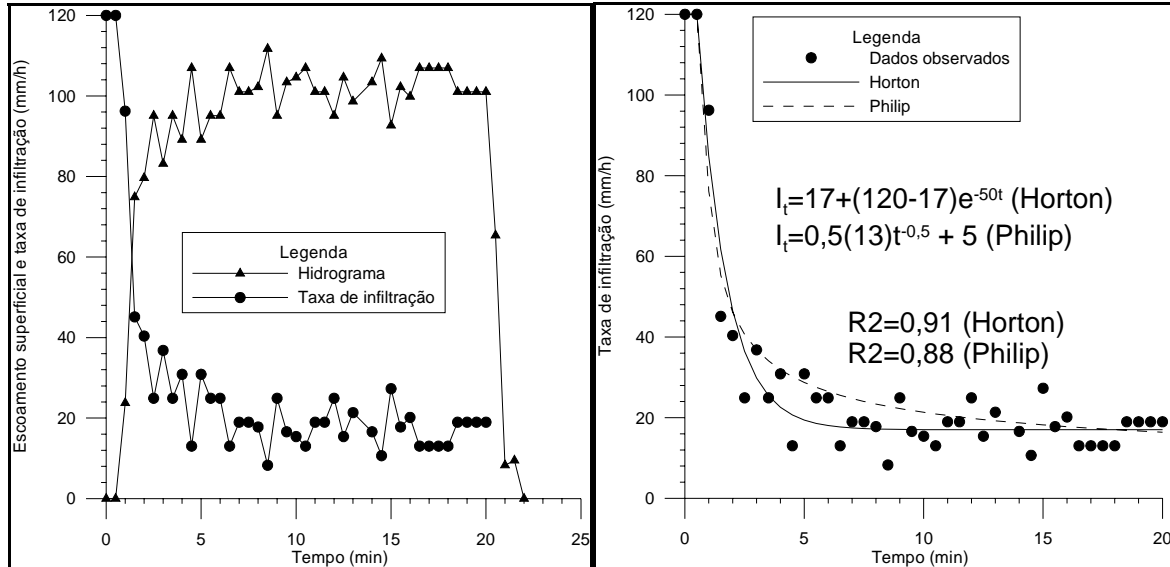
(a) (b)
 Figura 6.33 – Simulação 1 ($i = 156 \text{ mm/h}$; solo aparentemente seco): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

Os hidrogramas e as taxas de infiltração das simulações realizadas no mês de setembro, que se caracteriza pela ausência total de chuvas naturais e baixa umidade do solo, são mostrados nas Figuras 6.34.



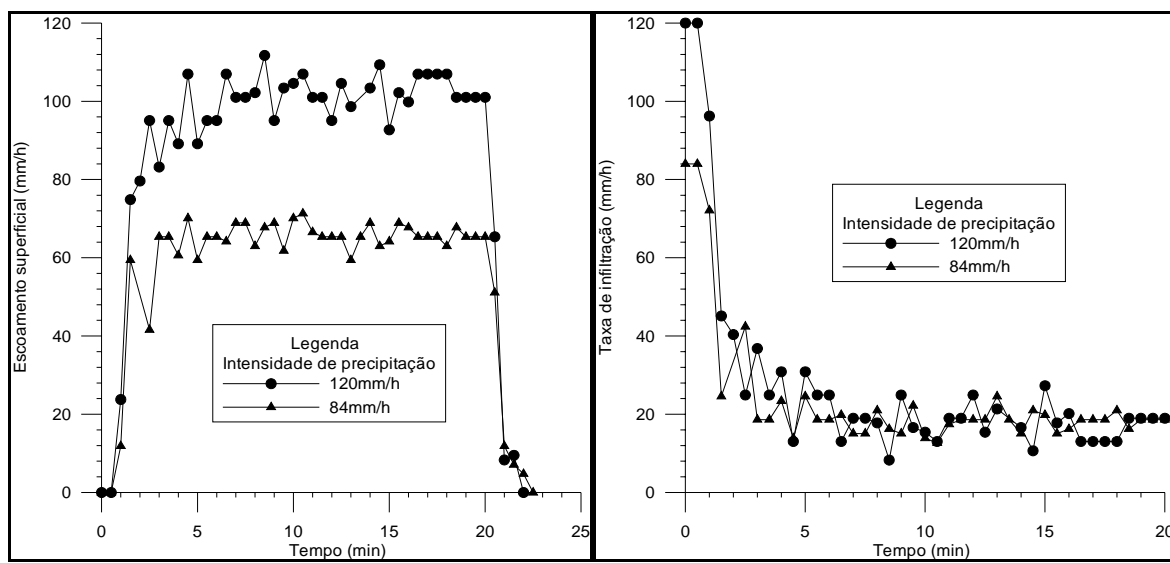
(a) (b)
 Figura 6.34 – Resultado das simulações do período seco/2004: (a) hidrogramas da superfície do BVBC 6%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BVBC 6%

O hidrograma e a curva da taxa de infiltração para a simulação do dia 23/11/2004 é mostrada na Figura 6.35. Entre os dias 08/11/2004 e 23/11/2004 a chuva total foi de 111,5 mm, que contribuiu para aumentar a umidade do solo.



(a) (b)
 Figura 6.35 – Simulação 3 ($i = 120 \text{ mm/h}$; solo aparentemente úmido): (a) hidrograma e curva da taxa de infiltração; (b) ajuste manual das equações de Horton e Philip aos dados observados

Para os meses de novembro e dezembro, os hidrogramas e taxas de infiltração são mostrados na Figura 6.36.



(a) (b)
 Figura 6.36 – Resultado das simulações do período úmido/2004: (a) hidrogramas da superfície do BVBC 6%; (b) curvas das taxas de infiltração da superfície do BVBC 6%

O resumo dos parâmetros de todas as simulações realizadas na superfície de BVBC 6% é mostrado na Tabela 6.10.

Tabela 6.10 – Resumo das simulações na parcela de BVBC 6%

	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4
Data	08/09/2004	09/09/2004	23/11/2004	01/12/2004
t_e (s)	60	30	30	30
t_m (s)	2160	1560	270	180
t_u (s)	3600	3600	1200	1200
t_f (s)	3690	3660	1290	1320
i (mm/h)	156	156	120	84
V_{esc} (L)	47,47	51,36	32,39	21,08
V_{prec} (L)	156,12	156,12	40,03	28,02
i_c (mm/h)	96	93	17	18
C	0,30	0,33	0,81	0,75

Analisando os dados das simulações 1 e 2 na Tabela 6.10, observa-se que os tempos de embebição e de entrada do regime permanente foram menores para a simulação 2. Isso possivelmente influenciou no maior coeficiente de escoamento da simulação 2 em relação a simulação 1.

Para as simulações 3 e 4, verificou-se que as infiltrações de base e os tempos de embebição e de entrada no regime permanente foram menores do que os observados nas simulações 1 e 2. Isso resultou em maiores coeficientes de escoamento superficial. A explicação para este comportamento foi a colmatação causada por sedimentos trazidos pelas chuvas juntamente com a passagem de veículos.

Comparando-se os coeficientes de escoamento com a parcela de BVBC 2%, percebe-se que são praticamente iguais. Possivelmente, por a estrutura interna do solo da parcela de BVBC 6% ser heterogênea e apresentar um rearranjo de grãos diferente da parcela de BVBC 2%, tenham resultado em valores maiores do que o esperado para a infiltração de base. Comparando as simulações 3 e 4 da parcela de BVBC 6% com as simulações 3 e 4 da parcela de BVBC 2% verificou-se que os coeficientes de escoamentos foram um pouco

maiores para a superfície com maior declividade. É provável que a colmatação tenha sido maior para a parcela de BVBC 6%, o que explica a diferença.

Para os ensaios realizados no mês de setembro, os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.33 foram:

$$I_0 = 156 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 96 \text{ mm/h}$$

$$K = 5 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,84$$

Os parâmetros ajustados para a equação de Philip na Figura 6.33 foram:

$$S = 19 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 87 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,60$$

Verifica-se que o coeficiente R^2 mostrou um melhor ajuste para Horton.

Para os ensaios realizados nos meses de novembro e dezembro, os parâmetros ajustados para a equação de Horton na Figura 6.35 foram:

$$I_0 = 120 \text{ mm/h}$$

$$I_b = 17 \text{ mm/h}$$

$$K = 50 \text{ h}^{-1}$$

$$R^2 = 0,91$$

Os parâmetros ajustados para a equação de Philip na Figura 6.35 foram:

$$S = 13 \text{ mm/h}^{1/2}$$

$$A = 5 \text{ mm/h}$$

$$R^2 = 0,88$$

Tanto os ajustes para os meses de setembro e novembro não foram para a curva da capacidade de infiltração da superfície, já que foi observado um pequeno tempo de embebição nessas simulações. No caso de colmatação da superfície e passagem de veículos os coeficientes R^2 indicaram uma boa aderência tanto de Horton quanto de Philip aos dados observados.

6.1.5. Análise global dos resultados

A Tabela 6.11 tem um resumo geral dos resultados para todas as superfícies simuladas.

Tabela 6.11 – Resumo geral de todos os parâmetros das superfícies permeáveis

Superfícies		S _o (%)	i (mm/h)	i _c (mm/h)		C	
Gramma		6,0	120 a 156	88 a 124		0,17 a 0,24	
Chão batido		3,5	120 a 156	38 a 64		0,52 a 63	
				Não colmatada		Colmatada	
				i _c (mm/h) (v)	C (vi)	i _c (mm/h)	C
BM (i)	BNC	2,0	84 a 120	66 a 70	0,13 a 0,39	14 a 17	0,81 a 0,82
	(iii)	7,0	60 a 120	29 a 31	0,48 a 0,74	7 a 13	0,80 a 0,93
	BC	2,0	84 a 120	36 a 37	0,53 a 0,69	12 a 13	0,79 a 0,88
	(iv)	6,0	84 a 120	48 a 52	0,34 a 0,53	14 a 28	0,71 a 0,83
BV (ii)	BNC	2,0	84 a 156	117 a 118	0,0074 a 0,24	49 a 67	0,37 a 0,40
		7,0	84 a 156	106 a 108	0,096 a 0,10	24 a 52	0,63 a 0,67
	BC	2,0	84 a 156	80 a 85	0,31 a 0,35	23 a 24	0,63 a 0,76
		6,0	84 a 156	93 a 96	0,30 a 0,33	17 a 18	0,75 a 0,81

- (i) – bloco maciço
(ii) – bloco vazado
(iii) – base não compactada
(iv) – base compactada
(v) – infiltração de base
(vi) – coeficiente de escoamento

Analisando-se a Tabela 6.11 algumas conclusões importantes podem ser tiradas. A superfície gramada, apesar de ter uma declividade alta, apresentou valores altos para a infiltração de base. Essa alta capacidade de infiltração da superfície gramada resultou em baixos coeficientes de escoamento superficial. Deve-se lembrar que os valores observados para a os coeficiente de escoamento superficial calculados são fortemente influenciados pela condição de umidade antecedente do solo. Observou-se através do experimento na parcela experimental de BV 2% que a infiltração de base não sofreu influência da umidade do solo. A infiltração de base sofreu uma redução por meio da colmatação e da passagem de veículos nas superfícies permeáveis.

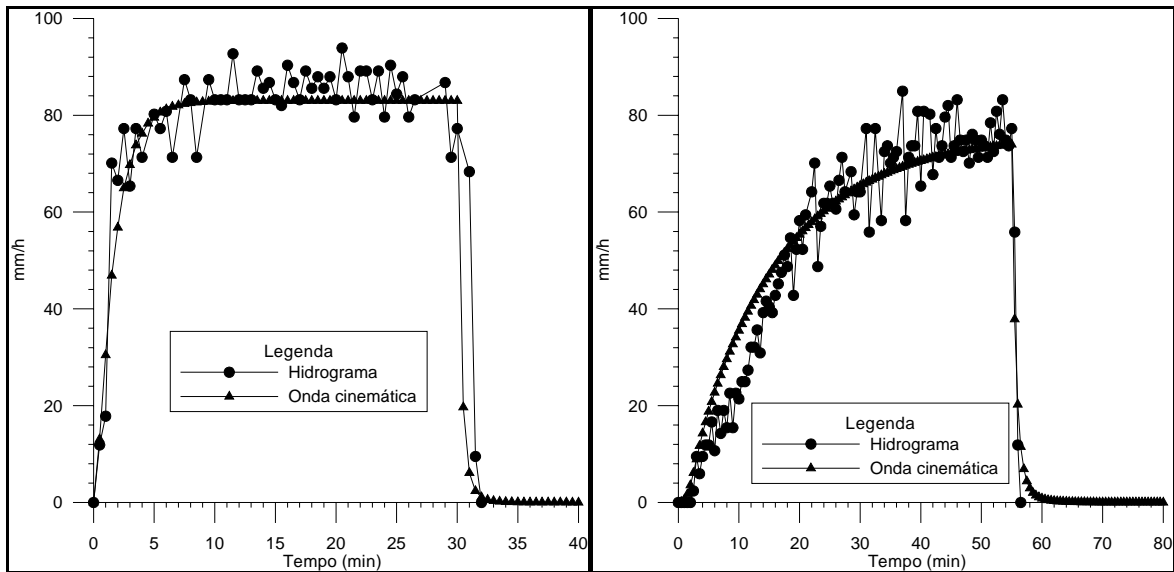
A utilização da superfície de chão batido apresentou aspectos negativos em relação à superfície gramada. A infiltração de base sofreu uma redução de quase 60%, o que fez com que o coeficiente de escoamento aumentasse cerca de três vezes. Isso mostra o efeito que a retirada da vegetação e a compactação do solo causa na geração do escoamento superficial.

A superfície de blocos maciços apresentou aspectos negativos em relação à superfície gramada. A taxa final de infiltração sofreu uma redução de 65% e o coeficiente de escoamento aumentou em quase três vezes. Nos experimentos ocorreu um caso incomum, em que uma superfície de base não compactada de declividade 7% apresentou uma taxa final de infiltração menor do que a superfície com base compactada de declividade 6%. A estrutura interna do solo, através da heterogeneidade do solo e do rearranjo dos grãos, provavelmente influenciou nos valores de infiltração. A colmatação da superfície por sedimentos e a passagem de veículos fez com que a infiltração de base dependesse muito pouco da declividade da parcela e da compactação da base, como mostram os coeficientes de escoamento.

Analisando os resultados da Tabela 6.11, percebe-se que a superfície de blocos vazados mostrou ser a melhor alternativa para o controle do escoamento superficial, tanto para os casos de compactação como de não compactação da base. As superfícies de blocos vazados sem a compactação da base foram até mais eficientes no controle do escoamento superficial que a superfície gramada. A alta infiltração de base observada nas superfícies de blocos vazados pode diminuir devido à colmatação por sedimentos e a passagem de veículos. Em números, a infiltração de base chegou a ter uma redução de 80% e o coeficiente de escoamento teve seu valor aumentado em mais de sessenta vezes. Os coeficientes de escoamento passaram a ter uma menor dependência da declividade da parcela e da compactação da base, assim como verificado para a superfície de blocos maciços. A exceção é a parcela de declividade 2% sem a compactação da base, onde provavelmente a colmatação por sedimentos foi menor do que nas outras parcelas.

6.2. ESTUDO DE CASO

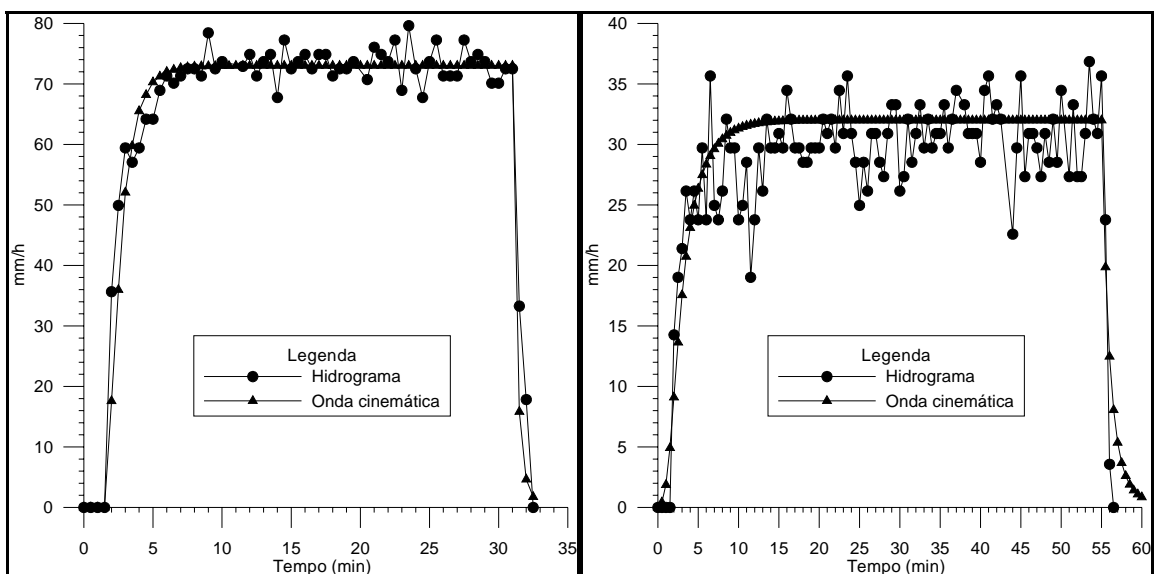
O primeiro passo para a realização desse estudo de caso foi verificar a validade do modelo da onda cinemática. Para a verificação foi necessário conhecer os coeficientes de rugosidade de Manning de todas as superfícies. Através dos hidrogramas observados nas superfícies, os coeficientes foram ajustados a esses hidrogramas com o uso do modelo da onda cinemática. Os coeficientes de Manning ajustados são apresentados nas Figuras 6.37 e 6.38.



(a)

(b)

Figura 6.37 – Ajuste do coeficiente de rugosidade de Manning: (a) BMBC 2%, $n = 0,015$; (b) BVBC 2%, $n = 0,10$



(a)

(b)

Figura 6.38 – Ajuste do coeficiente de rugosidade de Manning: (a) Chão batido 2%, $n = 0,015$; (b) Grama 2%, $n = 0,20$

Os coeficientes rugosidade de Manning ajustados foram utilizados na equação de Manning para o cálculo da altura de lâmina de água teórica na superfície. Essa lâmina de água deveria respeitar os valores exigidos pelos critérios para aplicação da onda cinemática. A Tabela 6.12 mostra a avaliação dos critérios feita para cada pavimento.

Tabela 6.12 – Verificação da aplicabilidade dos critérios da onda cinemática

GRAMA $S_o = 2\%$	CHÃO BATIDO $S_o = 2\%$	BLOCO MACIÇO $S_o = 2\%$	BLOCO VAZADO $S_o = 2\%$
Q _o (mm/h)			
14,26	35,65	11,88	2,38
36,84	79,63	93,89	84,98
Froude (mm)			
$y_o > 0,09$	$y_o > 0,16$	$y_o > 0,08$	$y_o > 0,03$
$y_o > 0,17$	$y_o > 0,28$	$y_o > 0,31$	$y_o > 0,29$
Índice K (mm)			
$y_o > 0,02$	$y_o > 0,08$	$y_o > 0,03$	$y_o > 0,007$
$y_o > 0,06$	$y_o > 0,17$	$y_o > 0,26$	$y_o > 0,24$
Desigualdade de Ponce (mm)			
$y_o < 0,76$	$y_o < 0,92$	$y_o < 0,47$	$y_o < 0,39$
$y_o < 1,23$	$y_o < 1,38$	$y_o < 1,32$	$y_o < 2,32$
Manning (mm)			
$y_o = 0,51$	$y_o = 0,22$	$y_o = 0,13$	$y_o = 0,16$
$y_o = 0,90$	$y_o = 0,35$	$y_o = 0,46$	$y_o = 1,36$

Na Tabela 6.12, para cada superfície, tem-se a vazão máxima e mínima obtida nos ensaios experimentais. Essas vazões são representadas pelo símbolo Q_o. Para cada vazão foram verificados os critérios de aplicabilidade da onda cinemática, como apresentado na Tabela 6.12.

Para a superfície de asfalto foi adotado um coeficiente de rugosidade de Manning de 0,015 e declividade de 2%. As superfícies asfálticas se caracterizam por terem uma baixa rugosidade e velocidades altas, mesmo para baixas declividades. Com isso o termo de pressão da equação de Saint-Vennat pode ser desprezado, e a onda cinemática pode ser aplicada. Na superfície asfáltica foi considerado que toda a precipitação era transformada em escoamento superficial, ou seja, que a infiltração era nula.

O solo do estacionamento foi adotado como sendo o mesmo do local onde foram realizados os ensaios experimentais, ou seja, um solo argiloso com as características descritas no apêndice A.

Os parâmetros da equação de Horton que foram utilizados para as demais superfícies estão apresentados na Tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Curvas teóricas de infiltração utilizadas no estudo de caso

Superfícies permeáveis	Parâmetros da equação de Horton
Bloco maciço com declividade 2%	$I_o = 120 \text{ mm/h}$; $I_b = 37 \text{ mm/h}$; $K = 40 \text{ h}^{-1}$
Bloco vazado com declividade 2%	$I_o = 156 \text{ mm/h}$; $I_b = 80 \text{ mm/h}$; $K = 4 \text{ h}^{-1}$
Chão batido com declividade 2%	$I_o = 120 \text{ mm/h}$; $I_b = 47 \text{ mm/h}$; $K = 60 \text{ h}^{-1}$
Gramma com declividade de 2%	$I_o = 120 \text{ mm/h}$; $I_b = 88 \text{ mm/h}$; $K = 25 \text{ h}^{-1}$

As precipitações utilizadas nas simulações foram calculadas pela equação da curva IDF para a região do Distrito Federal, mostrada pela Equação 6.1.

$$i = \frac{21,7 \cdot T^{0,16}}{(t_c + 11)^{0,815}} \quad (\text{Equação 6.1})$$

Onde: i = intensidade de precipitação (mm/min)

T = período de retorno (anos)

t_c = tempo de concentração (min)

Para precipitações de duração de 10 minutos e tempos de retorno de 2, 5 e 10 anos, foram obtidas as intensidades de 122 mm/h, 141 mm/h e 157 mm/h.

As vazões máximas calculadas da simulação, os tempos de ascensão do hidrograma e os volumes calculados do hidrograma para a superfície de asfalto são apresentados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Parâmetros do hidrograma para a superfície de asfalto

Tempo de retorno (anos)	Planos	Dimensões (m)	Vazão de pico (l/s)	t_a (min)	V (L)
2	1	31 x 16	16,68	2,5	9998,8
	2	12 x 27	10,89	3,0	6529,1
	3	18 x 32	19,37	4,0	11604,4
	4	25 x 48	40,35	5,0	24150,0
	5	25 x 64	53,80	5,5	32153,9
	6	12 x 74	29,86	5,5	17826,9
5	1	31 x 16	19,29	3,0	11567,7
	2	12 x 27	12,60	3,0	7554,3
	3	18 x 32	22,41	4,0	13427,4
	4	25 x 48	46,68	4,5	27949,4
	5	25 x 64	62,25	6,0	37221,4
	6	12 x 74	34,54	5,5	20639,7
10	1	31 x 16	21,50	3,0	12888,9
	2	12 x 27	14,04	4,5	8417,6
	3	18 x 32	24,97	3,5	14962,4
	4	25 x 48	52,02	6,5	31148,8
	5	25 x 64	69,36	5,5	41488,4
	6	12 x 74	38,49	5,5	23008,3

t_a = tempo de ascensão do hidrograma; V = volume do hidrograma

A baixa rugosidade da superfície de asfalto aliada a infiltração nula fez com que a vazão de pico fosse rapidamente atingida. A mesma simulação ocorreu nos planos do estacionamento para a situação em que a superfície estava coberta com blocos maciços. As vazões de pico são mostradas na Tabela 6.15

Tabela 6.15 – Parâmetros do hidrograma para a superfície com blocos maciços

Tempo de retorno (anos)	Planos	Dimensões (m)	Vazão de pico (l/s)	t_a (min)	V (L)
2	1	31 x 16	11,68	5,5	6164,0
	2	12 x 27	7,62	5,0	4024,5
	3	18 x 32	13,55	6,5	7151,6
	4	25 x 48	28,21	8,5	14871,6
	5	25 x 64	37,57	8,5	19780,9
	6	12 x 74	20,83	7,5	10959,4
5	1	31 x 16	14,30	6,5	7748,7
	2	12 x 27	9,34	6,0	5060,9
	3	18 x 32	16,60	6,0	8994,8
	4	25 x 48	34,56	7,5	18714,1
	5	25 x 64	46,04	10,0	24906,1
	6	12 x 74	25,54	7,5	13804,3
10	1	31 x 16	16,50	5,5	9039,5
	2	12 x 27	10,78	4,5	5901,1
	3	18 x 32	19,16	7,5	10487,3
	4	25 x 48	39,90	7,0	21819,5
	5	25 x 64	53,17	9,0	29044,3
	6	12 x 74	29,49	7,5	16100,5

t_a = tempo de ascensão do hidrograma; V = volume do hidrograma

A existência de infiltração na superfície de blocos maciços fez com que valor da vazão de pico fosse menor e o tempo de ascensão (t_a) aumentasse em relação à superfície de asfalto. Isso logicamente resultou em um menor volume de hidrograma que a superfície asfáltica. Para a superfície de chão batido, as vazões de pico são mostradas na Tabela 6.16. Os tempos de ascensão foram um pouco menores do que os observados para a superfície de blocos maciços, mas as vazões de pico e os volumes do hidrograma foram menores.

Tabela 6.16 – Parâmetros do hidrograma para a superfície de chão batido

Tempo de retorno (anos)	Planos	Dimensões (m)	Vazão de pico (l/s)	t _a (min)	V (L)
2	1	31 x 16	10,33	4,5	5719,0
	2	12 x 27	6,75	6,5	3738,8
	3	18 x 32	12,00	4,5	6648,3
	4	25 x 48	25,00	5,5	13857,8
	5	25 x 64	33,32	7,5	18482,5
	6	12 x 74	18,49	7,0	10259,1
5	1	31 x 16	12,95	3,5	7300,0
	2	12 x 27	8,46	4,0	4770,9
	3	18 x 32	15,04	7,0	8483,1
	4	25 x 48	31,33	6,5	17680,2
	5	25 x 64	41,77	6,0	23579,6
	6	12 x 74	23,18	7,0	13088,1
10	1	31 x 16	15,15	5,0	8592,1
	2	12 x 27	9,90	3,5	5613,0
	3	18 x 32	17,60	4,0	9979,6
	4	25 x 48	36,66	5,5	20795,9
	5	25 x 64	48,88	6,0	27733,1
	6	12 x 74	27,13	7,5	15393,3

t_a = tempo de ascensão do hidrograma; V = volume do hidrograma

Para a superfície gramada, a vazão máxima, o tempo de ascensão e o volume do hidrograma são mostrados na Tabela 6.17.

Tabela 6.17 – Parâmetros do hidrograma para a superfície gramada

Tempo de retorno (anos)	Planos	Dimensões (m)	Vazão de pico (l/s)	t _a (min)	V (L)
2	1	31 x 16	3,77	10	2248,3
	2	12 x 27	1,63	10	1465,6
	3	18 x 32	2,44	10	2602,3
	4	25 x 48	3,40	10	5396,8
	5	25 x 64	3,40	10	7156,4
	6	12 x 74	1,63	10	3956,6
5	1	31 x 16	6,83	10	3840,5
	2	12 x 27	3,72	10	2506,0
	3	18 x 32	5,83	10	4452,2
	4	25 x 48	8,28	10	9251,4
	5	25 x 64	8,28	10	12296,4
	6	12 x 74	3,98	10	6809,4
10	1	31 x 16	9,17	10	5181,5
	2	12 x 27	5,47	10	3382,3
	3	18 x 32	9,00	10	6010,3
	4	25 x 48	13,59	10	12498,4
	5	25 x 64	13,64	10	16626,3
	6	12 x 74	6,55	10	9212,6

t_a = tempo de ascensão do hidrograma; V = volume do hidrograma

Observa-se na Tabela 6.17 uma diminuição brusca da vazão de pico para a superfície coberta com grama em relação à coberta com asfalto. Para o plano 5, com tempo de retorno de 10 anos, essa redução foi de mais de 5 vezes. A boa capacidade de infiltração aliada à alta rugosidade da superfície fez com que os tempos de ascensão fossem iguais aos tempos de duração da chuva.

A Tabela 6.18 mostra os resultados das simulações para a superfície de blocos vazados. A simulação para o tempo de retorno de 2 anos e duração de 10 minutos não produziu escoamento superficial. Para os tempos de retorno de 5 e 10 anos, as vazões de pico observadas foram muito baixas, sendo inferiores às observadas para a superfície gramada. Os valores do tempo de ascensão também foram iguais à duração da precipitação, o que gerou um hidrograma com volume menor que o da superfície gramada.

Tabela 6.18 – Parâmetros do hidrograma para a superfície de blocos vazados

Tempo de retorno (anos)	Planos	Dimensões (m)	Vazão de pico (l/s)	t_a (min)	V (L)
5	1	31 x 16	0,72	10	668,4
	2	12 x 27	0,28	10	434,4
	3	18 x 32	0,42	10	770,1
	4	25 x 48	0,58	10	1587,6
	5	25 x 64	0,58	10	2090,0
	6	12 x 74	0,28	10	1149,7
10	1	31 x 16	3,57	10	1856,8
	2	12 x 27	1,53	10	1211,0
	3	18 x 32	2,30	10	2150,8
	4	25 x 48	3,20	10	4464,4
	5	25 x 64	3,20	10	5926,1
	6	12 x 74	1,53	10	3278,7

t_a = tempo de ascensão do hidrograma; V = volume do hidrograma

A Figura 6.39 mostra os hidrogramas de escoamento simulados no plano 5 para o tempo de retorno de 10 anos. Pode-se ver claramente a discrepância dos valores das vazões máximas do asfalto em relação à grama e os blocos vazados. A vazão para a cobertura em asfalto é cerca de 21 vezes maior do que para a superfície de blocos vazados. Isto justifica o desequilíbrio no ciclo hidrológico das bacias causado pelas superfícies impermeáveis.

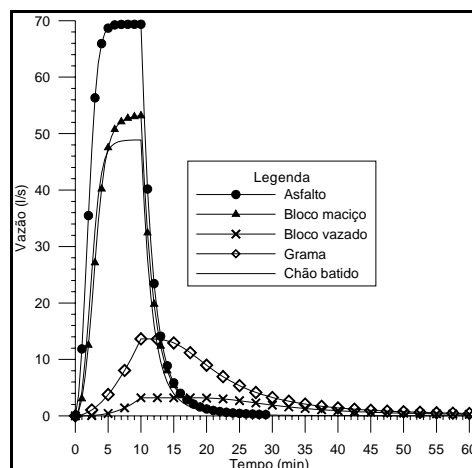


Figura 6.39 – Hidrogramas de escoamento para o plano 5 ($A = 1600 \text{ m}^2$) com tempo de retorno de 10 anos ($i = 157 \text{ mm/h}$)

Recolhido todo o escoamento superficial que foi propagado nos planos, sarjetas e galerias, tem-se o hidrograma final da área do estacionamento. A Tabela 6.19 apresenta os dados característicos dos hidrogramas para cada superfície.

Tabela 6.19 – Parâmetros característicos dos hidrogramas das superfícies

GRAMA								
T = 2 anos			T = 5 anos			T = 10 anos		
Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)
16,27	13,0	20983,5	36,78	13	37276,1	57,03	12,5	51019,6
CHÃO BATIDO								
T = 2 anos			T = 5 anos			T = 10 anos		
Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)
105,83	9,0	58674,9	132,68	9,0	74869,8	155,28	9,5	88073,7
BLOCO VAZADO								
T = 2 anos			T = 5 anos			T = 10 anos		
Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)
0,0	0,0	0,0	2,89	13,0	6591,6	15,35	13,0	18776,1
BLOCO MACIÇO								
T = 2 anos			T = 5 anos			T = 10 anos		
Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)
119,13	11,0	62897,7	146,06	11,0	79176,1	168,7	10,5	92339,9
ASFALTO								
T = 2 anos			T = 5 anos			T = 10 anos		
Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)	Q_p (l/s)	t_a (min)	V (l)
170,97	7,5	102211,7	197,81	7,0	118305,0	220,4	7,5	131860,5

Q_p = vazão de pico; t_a = tempo de ascensão; V = volume do hidrograma

Observando-se os dados da Tabela 6.19 pode-se chegar à conclusão de que a superfície de blocos vazados gera um menor escoamento do que a de grama. Nos parâmetros da equação de Horton percebe-se que a infiltração de base na grama é maior que no chão batido, ou seja, para chuvas de longa duração a grama gera um escoamento superficial menor do que a superfície de blocos vazados. Os dados da Tabela 6.19 são claramente apresentados através das Figuras 6.40, 6.41 e 6.42, que mostram os hidrogramas finais para cada tempo de retorno.

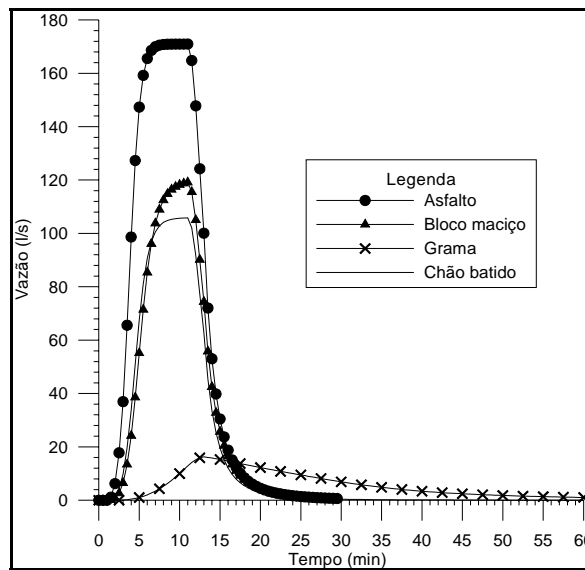


Figura 6.40 – Hidrogramas da área de estacionamento para o tempo de retorno de 2 anos ($i = 122 \text{ mm/h}$)

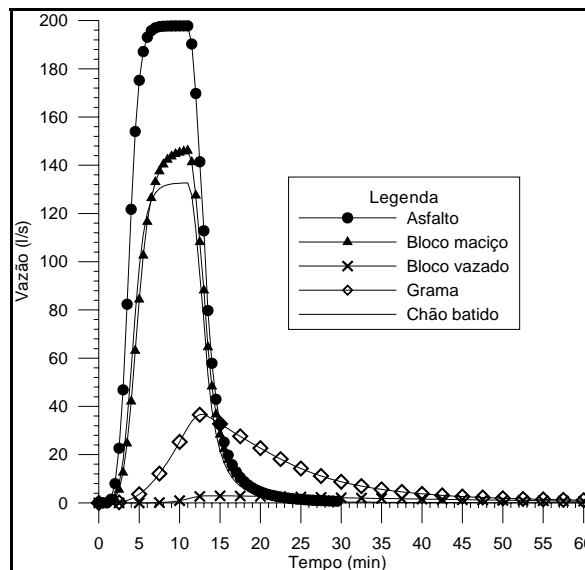


Figura 6.41 – Hidrogramas da área de estacionamento para o tempo de retorno de 5 anos ($i = 141 \text{ mm/h}$)

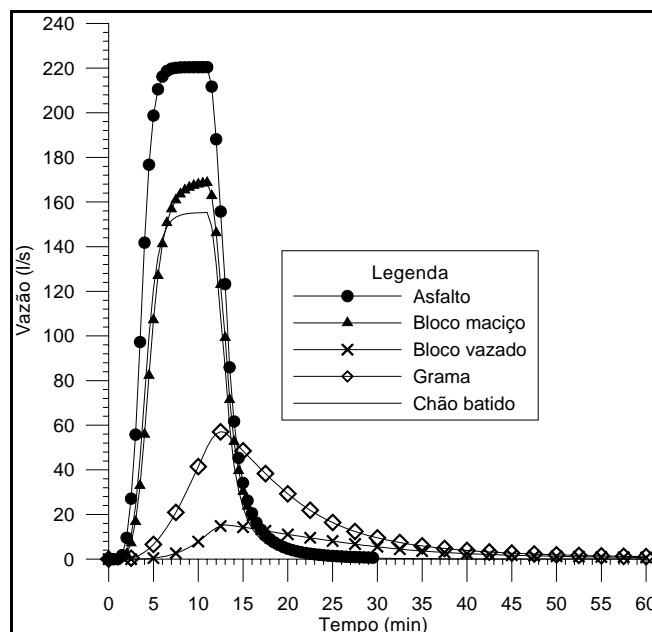
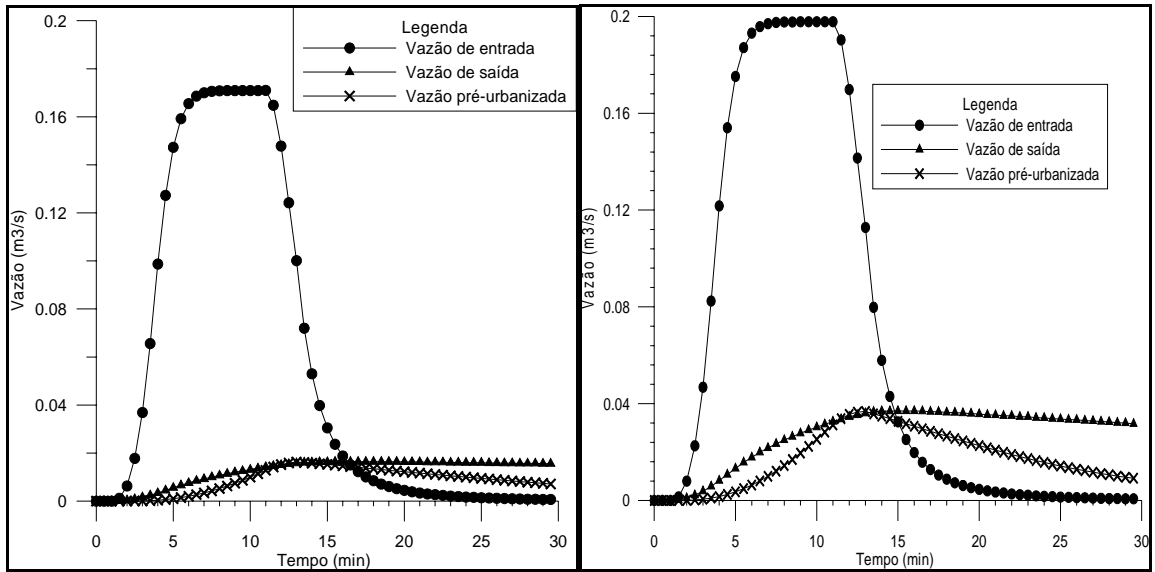


Figura 6.42 – Hidrogramas da área de estacionamento para o tempo de retorno de 10 anos ($i = 157 \text{ mm/h}$)

O conceito moderno de drenagem urbana sustentável indica que o escoamento superficial excedente que é produzido pela ocupação do solo deve ser controlado. Apesar das superfícies com blocos maciços e chão batido terem diminuído a vazão de pico e o volume do hidrograma em relação à superfície de asfalto, ainda tem um escoamento superficial maior do que a superfície gramada. Uma estrutura deve ser instalada para a diminuição desse escoamento excedente. Nesse trabalho a estrutura utilizada foi um reservatório de detenção. A vazão de entrada foram os hidrogramas gerados no estacionamento por cada superfície. A vazão de saída do reservatório é a vazão máxima da superfície gramada. O volume excedente é armazenado e liberado gradualmente para a rede de drenagem.

Como a superfície de blocos vazados tem uma vazão de pico menor do que a da superfície gramada, o seu volume não precisa ser controlado pelo reservatório, podendo ser lançado diretamente na rede de drenagem pluvial.

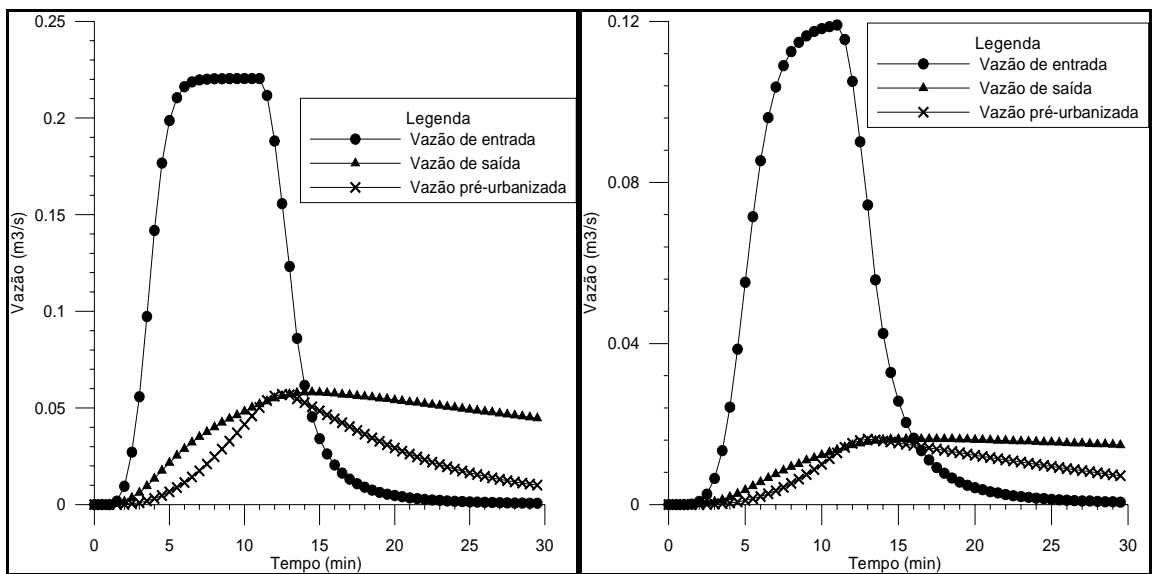
As Figuras 6.43 a 6.47 mostram as vazões de entrada do reservatório, as vazões de saída e a vazão de pré-urbanização para a área do estacionamento. A condição de pré-urbanização adotada foi a cobertura da área do estacionamento pela superfície gramada.



(a)

(b)

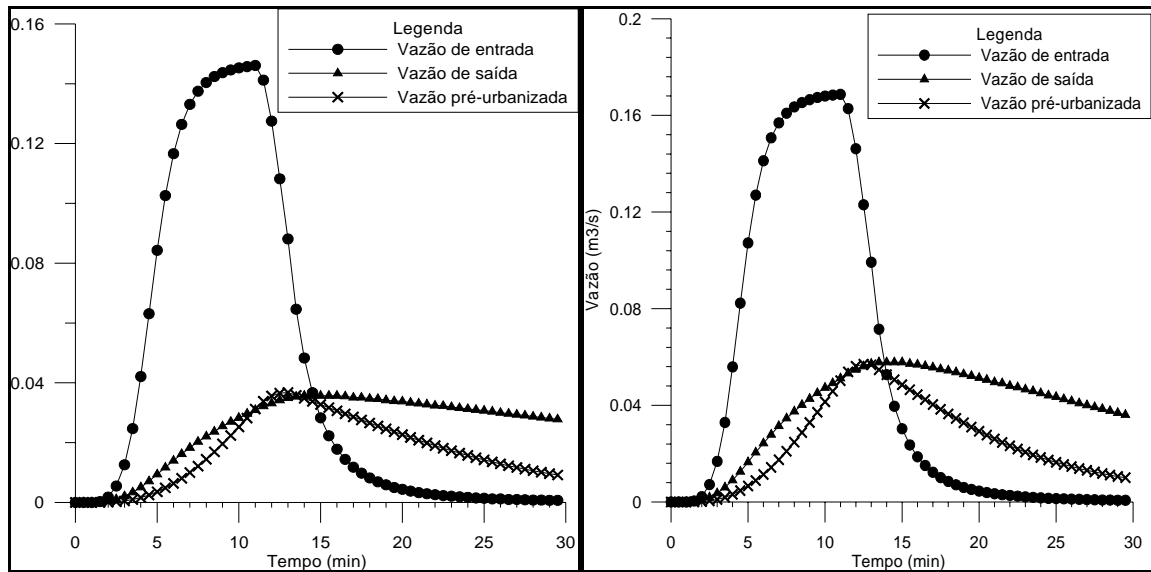
Figura 6.43 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório para: (a) Asfalto, T = 2 anos; (b) Asfalto, T = 5 anos



(a)

(b)

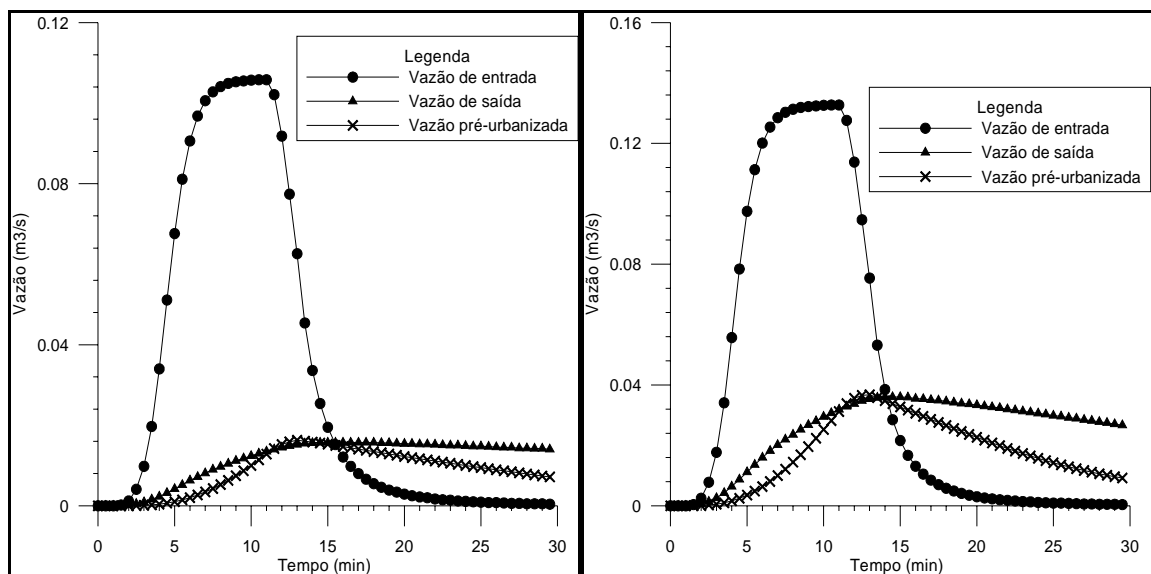
Figura 6.44 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório para: (a) Asfalto, T = 10 anos; (b) BMBC 2%, T = 2 anos



(a)

(b)

Figura 6.45 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório para: (a) BMBC 2%, T = 5 anos; (b) BMBC 2%, T = 10 anos



(a)

(b)

Figura 6.46 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório para: (a) Chão batido, T = 2 anos; (b) Chão batido, T = 5 anos

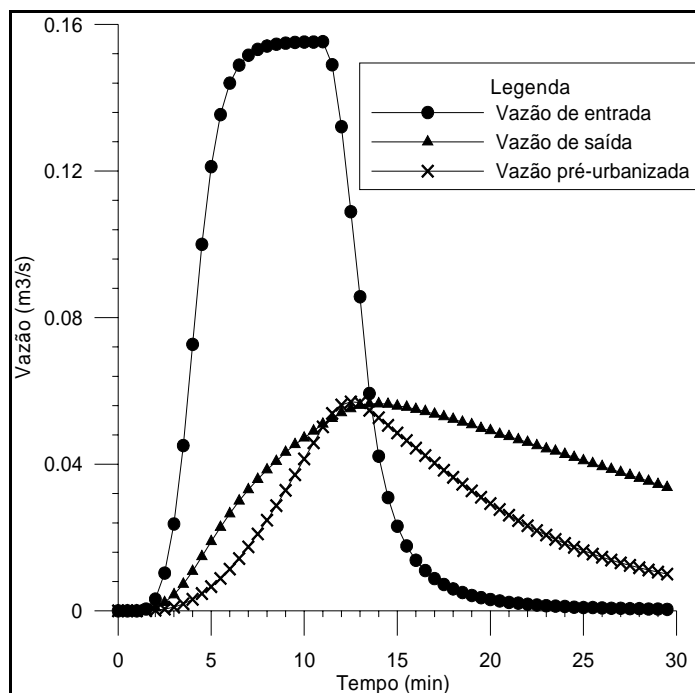


Figura 6.47 – Vazão de entrada, vazão de saída e vazão da área gramada no reservatório para o Chão batido, T = 10 anos

Pela análise das Figuras 6.43 a 6.47 percebe-se que a superfície de asfalto demanda um maior volume de armazenamento que as demais superfícies. O volume armazenado e a área do reservatório para cada superfície são mostrados na Tabela 6.20

Tabela 6.20 – Volume de armazenamento e área do reservatório para cada superfície

Superfícies	Tempo de retorno(anos)	Volume armazenado (m ³)	Área real (m ²)	Área do reservatório (m ²)
Asfalto	2	89,9	94,67	95
	5	94,9	99,9	100
	10	98,0	103,15	105
Blocos maciços	2	51,6	54,37	55
	5	58,0	61,09	65
	10	60,8	64,04	65
Chão batido	2	48,1	50,6	55
	5	54,2	57,08	60
	10	58,0	60,95	65

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após uma análise cuidadosa dos resultados de todas as simulações realizadas nas superfícies permeáveis, pode-se extrair algumas conclusões importantes.

Em todas as simulações realizadas na superfície gramada verificou-se o alto valor da infiltração de base. Isso mostra que a construção de áreas gramadas nas grandes cidades é uma boa alternativa para o controle do escoamento superficial. Já para a superfície de chão batido a conclusão que se chegou foi que a retirada da vegetação e a compactação do solo contribuem muito para o aumento do escoamento superficial. A infiltração de base, que era de 88 mm/h na superfície gramada, reduziu-se para 38 mm/h na superfície de chão batido. O coeficiente de escoamento teve um salto de 0,17, valor encontrado na grama, para 0,52, um aumento de mais de três vezes. Por causa das chuvas ocorridas, o valor do coeficiente de escoamento para as superfícies gramada e chão batido sofreu uma influência da umidade do solo no início da simulação.

Para o caso das superfícies permeáveis construídas com blocos maciços foi verificado que a compactação da base aumentou o escoamento superficial produzido. O coeficiente de escoamento que variava entre 0,13 a 0,39 para a superfície de BM 2% passou a variar entre 0,53 a 0,69 para a superfície de BMBC 2%. Foi verificada uma exceção entre as superfícies de BM 7% e BMBC 6%, já que o coeficiente de escoamento foi maior para a superfície de BM 7%. A heterogeneidade do solo e o rearranjo dos grãos podem ter influenciado nesse resultado. Quanto à declividade, foi verificado que maiores declividades aumentaram o escoamento superficial. Novamente a exceção foi a parcela de BMBC 6%, pelos motivos anteriormente citados. A colmatação da superfície por sedimentos e a passagem de veículos aumentaram o coeficiente de escoamento, reduzindo conseqüentemente a infiltração de base. Para a superfície de BMBC 2%, o coeficiente de escoamento passou de 0,53 para 0,79, um aumento de 50%.

As superfícies de blocos vazados se mostraram muito eficientes no controle do escoamento superficial, apresentando uma alta infiltração de base e baixo coeficiente de escoamento. A infiltração de base para a superfície de BV 2% chegou a ser de 117 mm/h, valor só inferior a uma simulação para a superfície gramada, que chegou a ter 124 mm/h de infiltração de base. Assim como verificado nas superfícies de blocos maciços, maiores declividades

contribuem para o aumento do escoamento superficial. A superfície de BV 2%, por exemplo, que teve um valor de infiltração de base de 118 mm/h, foi de 106 mm/h para a superfície de BV 7%.

Assim como nos blocos maciços houve uma exceção, pois a superfície de BVBC 6% apresentou uma infiltração de base maior do que a superfície de BVBC 2%. Quando essas superfícies sofreram o processo de colmatação e tiveram a passagem de veículos, o seu desempenho foi comprometido. A superfície de BVBC 6%, que tinha 93 mm/h de infiltração de base, passou a ter 17 mm/h, valor semelhante ao encontrado para os blocos maciços.

Isso mostra que tanto as superfícies de blocos maciços quanto de blocos vazados devem ter uma manutenção periódica a fim de evitar problemas com colmatação. Se isso não for possível, deve-se procurar evitar construir essas superfícies em locais pré-urbanizados e com intenso tráfego de veículos.

As curvas de infiltração de Horton e Philip puderam ser bem ajustadas aos dados experimentais de infiltração. Em praticamente todos os ensaios a equação de Horton os dados tiveram um melhor ajuste do que a equação de Philip. A curva de capacidade de infiltração foi modificada com a colmatação das superfícies pelo aporte de sedimentos e passagem de veículos, com diminuição da infiltração de base, e o rápido decréscimo da taxa inicial de infiltração para a infiltração de base.

No estudo de caso foi avaliado o impacto na geração do escoamento superficial das superfícies de asfalto, blocos maciços, blocos vazados e chão batido tiveram em relação a superfície gramada. A superfície de blocos vazados foi muito eficiente no controle do escoamento superficial. Para precipitações com pequena duração, as infiltrações de base e as vazões observadas são menores do que a superfície gramada. Isso fez com que essa superfície não necessitasse de uma estrutura de reservação para o volume excedente. As superfícies de blocos maciços e chão batido tiveram desempenhos semelhantes. Enquanto o tempo de ascensão foi maior para a superfície de chão batido, o volume do hidrograma foi um maior para a superfície de blocos maciços. No fim os reservatórios de retenção utilizados para armazenar o volume excedente do escoamento para essas superfícies tiveram dimensões semelhantes.

Recomenda-se para pesquisas futuras repetir esses experimentos com um maior controle da umidade do solo e do aporte de sedimentos nas parcelas. Recomenda-se também para trabalhos futuros a modelagem e uma análise de variância dos dados experimentais obtidos. Uma outra opção seria realizar um estudo sobre qualidade da água proporcionado pelas superfícies permeáveis e possível contaminação dos lençóis freáticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agra, S.G. (2001). *Estudo Experimental de Micro-reservatórios para Controle do Escoamento Superficial*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Rio Grande do Sul, RS.
- Alves Sobrinho, T., Ferreira, P. A. e Pruski, F. F. (2002). “Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol. 6, nº 2, pp. 337-344.
- Alves Sobrinho, T., Vitorino, A. C. T., Souza, L. C. F., Gonçalves, M. C., Carvalho, D. F. (2003). “Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Vol. 7, nº 2, pp. 191-196.
- Andoh, R. Y. G. e Declerck, C. (1997). “A cost effective approach to stormwater management? Source control and distributed storage.” *Water Science and Technology*, Vol. 36, nº 8-9, pp. 307-311.
- Araújo, P. R. (1999). *Análise Experimental da Eficiência dos Pavimentos Permeáveis na Redução do Escoamento Superficial*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Rio Grande do Sul, RS.
- ASCE (1992). *Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems*. American Society of Civil Engineers, E.U.A., 724p.
- Bertoni, J.C.; Tucci, C.E.M. (2003). “Urbanización.” In: Tucci, C.E.M e Bertoni, J.C. (eds.) *Inundações Urbanas na América do Sul*. ABRH, Porto Alegre, Brasil, 1-9.
- Bertoni, J.C.; Maza, J.A.; Paoli, C.U. (2003). “Inundaciones y drenage urbano-Argentina.” In: Tucci, C.E.M.e Bertoni, J.C. (eds.) *Inundações Urbanas na América do Sul*. ABRH, Porto Alegre, Brasil, 151-253.
- Bouwer, H. (1986) “Intake Rate: Cylinder Infiltrometer.” In: Klute, A. (ed.) *Methods of Soil Analyses*. 2ª Edição. Madison, Wisconsin, E.U.A., 825-844.
- Brattebo, B. O. e Booth, D. B. (2003). *Long-Term Stormwater Quantity and Quality Performance of Permeable Pavement Systems*. Water Resources, Elsevier Press, Washington, E.U.A., 15p.
- Campana, N. A. e Eid, N. J. (2003). “Avaliação do Desempenho de Coberturas Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas.” *XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Curitiba, Brasil. Novembro de 2003.

- CETESB (1980). *Drenagem Urbana: Manual de Projeto*. 2ª edição. Departamento de águas e energia elétrica. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
- Chen, C. e Wong, T. S. W. (1990). "Evaluation of Coefficients for Overland Flow Analysis." *5th Conferência Internacional de Drenagem Urbana*. Osaka, Japão.
- Chow, Ven Te, Maidment, D. R., Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, E.U.A., 527p.
- Chow, Ven Te (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, E.U.A., 680p.
- Cruz, M.A.S., Araújo, P.R., Souza, V.C.B. (1999). "Estruturas de Controle do Escoamento Urbano na Microdrenagem." *XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Davies, J. W., Pratt, C. J., Scott, M. A. (2002). "Laboratory study of permeable pavement systems to support hydraulic modelling." *9th Conferência Internacional de Drenagem Urbana*. Portland, Oregon. E.U.A..
- Dierkes, C., Kuhlmann, L., Kandasamy, J., Angelis, G. (2002). "Pollution Retention Capability and Maintenance of Permeable Pavements." *9th Conferência Internacional de Drenagem Urbana*. Portland, Oregon. E.U.A..
- Fujita, S. (1997). "Measures to promote stormwater infiltration." *Water Science and Technology*, Vol. 36, nº 8-9, pp. 289-293.
- Genz, F. (1994). *Parâmetros para Previsão e Controle de Cheias Urbanas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Rio Grande do Sul, RS.
- Gerrits, J. e James, W. (2002). "Restoration of Infiltration Capacity of Permeable Pavers." *9th Conferência Internacional de Drenagem Urbana*. Portland, Oregon. E.U.A..
- Guo, J. C. Y. (2001). "Design of Infiltration Basins for Stormwater." In: Mays, L. W. (ed.) *Stormwater Collection Systems Design Handbook*. McGraw-Hill, New York, E.U.A., 9.1-9.35.
- Hunt, B., Stevens, S. e Mayes, D. (2002). "Permeable Pavement Use and Research at Two Sites in Eastern North Carolina." *9th Conferência Internacional de Drenagem Urbana*. Portland, Oregon, E.U.A..
- James, W. e von Langsdorff, H. (2003) "The Use of Permeable Concrete Block Pavement in Controlling Environment Stressors in Urban Areas." *7th Conferência Internacional de Pavimentos com Blocos de Concreto*. Portland, Oregon, E.U.A..
- Magalhães, P. C. (1989). "Hidrologia Superficial" In: Ramos, F., Occhipinti, A. G., Nova, N. A. V., Reichardt, K., Magalhães, P. C. e Cleary, R. W. (eds.) *Engenharia*

- Hidrológica*. Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 201-289.
- Makropoulos, C., Butler, D. e Maksimovic, C. (1999). "GIS supported evaluation of source control applicability in urban areas." *Water Science e Technology*, Vol. 39, nº 9, pp. 243-252.
- Milograna, J. (2001). *Estudo de medidas de controle de cheias em ambientes urbanos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF.
- Musgrave, G. W., Holtan, H. N. (1964). "Infiltration." In: Chow, Ven Te. *Handbook of Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York, E.U.A., 12.1-12.30.
- NOVACAP (1999). *Termo de Referência e Especificações para Elaboração de Projetos de Sistema de Drenagem Pluvial*. Departamento de Infra Estrutura Urbana do Distrito Federal.
- Pagotto, C., Legret, M. e Le Cloirec, P. (2000). "Comparison of the Hydraulic Behaviour and the Quality of Highway Runoff Water According to the type of pavement." *Water Science and Technology*, Vol. 34, nº 18, pp. 4446-4454.
- Parkinson, J., Milograna, J., Campos, L. C. e Campos, R. (2003). "Drenagem Urbana Sustentável no Brasil." *Relatório do Workshop em Goiânia-GO*, Goiânia, Brasil.
- Peterson, A. E. e Bubenzer, G. D. (1986). "Intake Rate: Sprinkler Infiltrometer" In: Klute, A. (ed.) *Methods of Soil Analyses*. 2º Edição. Madison, Wisconsin, E.U.A., 845-869.
- Pinto, N. L. S., Holtz, A. C. T., Martins, J. A. e Gomide, F. L. S. (1976). *Hidrologia Básica*. São Paulo, Editora Blucher. Rio de Janeiro, Fundação Nacional de Material Escolar. 278p.
- Porto, R. L., Filho, K. Z., Tucci, C. E. M., Bidone, F. (1993). "Drenagem Urbana" In: Tucci, C. E. M. (ed.) *Hidrologia : Ciência e Aplicação*. UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 952p.
- Porto, R. M. (1999). *Hidráulica Básica*. 2º edição. EESC-USP, Brasil, 519p.
- Ramos, C.L., Barros, M.T.L., Palos, J.C.F. (1999). *Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo*. Fundação Centro Tecnológico de São Paulo. Prefeitura do Estado de São Paulo, Brasil, 289p.
- Rawls, W. J., Ahuja, L. R., Brakensiek, D. L. e Shirmohammadi, A. (1993). "Infiltration and Soil Water Movement." In: Maidment, D. R. (ed.) *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York, E.U.A., 5.1-5.51.
- Righetto, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. 1º edição. EESC-USP, Brasil, 840p.

- Silva, G. B. L. e Campana, N. A. (2004). “Avaliação da Eficiência das Superfícies Permeáveis no Controle do Escoamento Superficial.” *III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste*. Goiânia, Brasil.
- Silveira, A. L. L., Louzada, J. L. e Beltrame, L. F. (1993). “Infiltração e Armazenamento no Solo.” In: Tucci, C. E. M. (ed.) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 335-372.
- Souza, V.C.B. (2002). *Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Rio Grande do Sul, RS.
- Souza, M. C. (2004). “Desenvolvimento e utilização de um simulador de chuvas para estudos de atributos físicos e químicos do solo relacionados a impactos ambientais”. *Embrapa Meio Ambiente*. Documento 37. 20p. Jaguariúna, SP.
- Tassi, R. (2002). *Efeito dos Microrreservatórios de Lote sobre a Macrodrenagem Urbana*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Rio Grande do Sul, RS.
- Tucci, C. E. M. (1993)a. “Fundamentos do Escoamento Não-Permanente.” In: Tucci, C. E. M. (ed.) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 373-389.
- Tucci, C. E. M. (1993)b. “Escoamento Superficial” In: Tucci, C. E. M. (ed.) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. UFRGS, Porto Alegre, Brasil, 391-441.
- Tucci, C. E. M. (2001). “Gerenciamento da Drenagem Urbana”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol 7. nº 1.
- Tucci, C.E.M. (2003)a. “Inundações e drenagem urbana.” In: Tucci, C.E.M., Bertoni, J.C. (eds.) *Inundações Urbanas na América do Sul*. ABRH, Porto Alegre, Brasil, 45-150.
- Tucci, C.E.M. (2003)b. “Águas Urbanas.” In: Tucci, C.E.M., Bertoni, J.C. (eds.) *Inundações Urbanas na América do Sul*. ABRH, Porto Alegre, Brasil, 11-44.
- Tucci, C. E. M. (2003)c. “Processos Hidrológicos e os Impactos do Uso do Solo” In: Tucci, C. E. M. e Braga, B. (eds.) *Clima e Recursos Hídricos no Brasil*. ABRH, Porto Alegre, Brasil, 31-75.
- Tucci, C. E. M., Netto, O. M. C. e Domingos, S. (2003). *A Questão da Drenagem Urbana no Brasil: Elementos para Formulação de uma Política Nacional de Drenagem Urbana*. Secretária Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília, Brasil, 30p.
- Tucci, C. E. M. e Genz, F. (1995). “Controle do impacto da urbanização.” In: Tucci, C. E. M., Porto, R. L. L. e Barros, M. T. (eds.) *Drenagem Urbana*. ABRH, Porto Alegre, Brasil, 277-347.

- Tucci, C. E. M. (2002). *Plano Diretor de Drenagem Urbana da Cidade de Caxias*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS, Porto Alegre, Brasil, paginação irregular.
- Urban Drainage and Flood Control District (2002). *Urban Storm Drainage Criteria Manual. Vol.3 – Best Management Practices*. Urban Drainage and Flood Control District, Denver, Colorado, E.U.A., irregular pages.
- Urbonas, B.; Stahre, P. (1993). *Stormwater Best Management Practices and Detention*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 450p.
- Urbonas, Ben R. e Roesner, L. A. (1993). “Hydrological design for urban drainage and flood control.” In: Maidment, D. R. (ed.) *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York, E.U.A., 28.1-28.52.
- Viessman, W. e Lewis, G. L. (2003). *Introduction to Hydrology*. Prentice Hall, New Jersey, E.U.A., 612p.
- Wilken, P. S. (1978). *Engenharia de drenagem superficial*. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, Brasil, 478p.
- Wong, T. S. (1993). *Assessment of Flood Peak Increase Due to Urbanization*. Tese de Doutorado, National University of Cingapore, 281p.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CLASSIFICAÇÃO E GRANULOMETRIA DOS SOLOS

a) Classificação de acordo com a ABNT (NBR 6502 – Rochas e solos)

Tabela A1 – Classificação do solo para cada superfície permeável

LOCAL	PROFUNDIDADE (cm)	CLASSIFICAÇÃO
Gramma	0-10	Argiloso
Solo batido	0-10	Argiloso
BM 2%	10-30	Argiloso
BM 7%	10-30	Argiloso
BMBC 2%	10-30	Argiloso
BMBC 6%	10-30	Argiloso
BV 2%	10-30	Argiloso
BV 7%	10-30	Argiloso
BVBC 2%	10-30	Argiloso
BVBC 6%	10-30	Argiloso

b) Curvas granulométricas

-Gramma e Chão batido

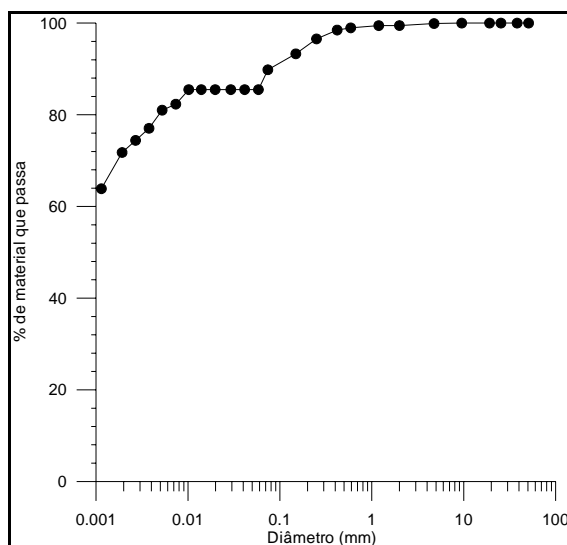


Figura A1 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de grama e chão batido

-BM 2% e BV 2%

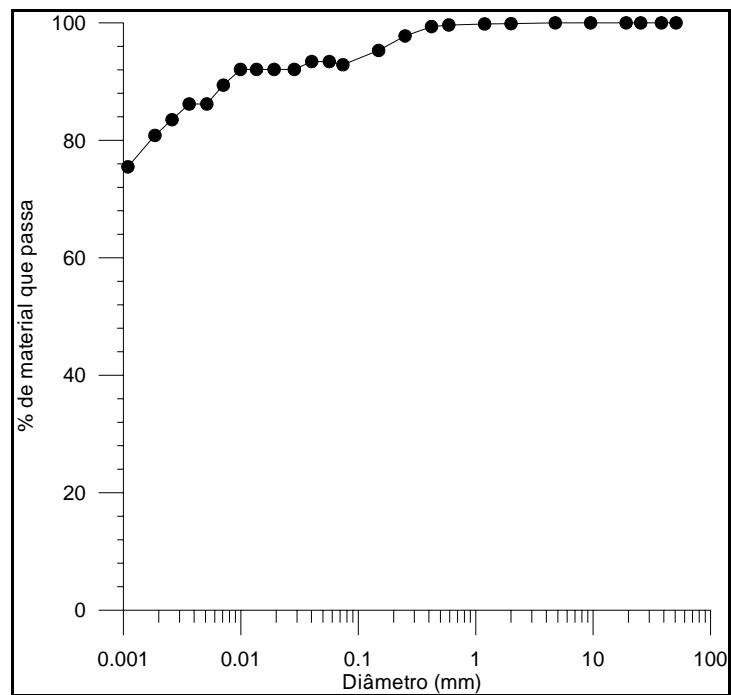


Figura A2 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de BV 2% e BM 2%

-BM 7%

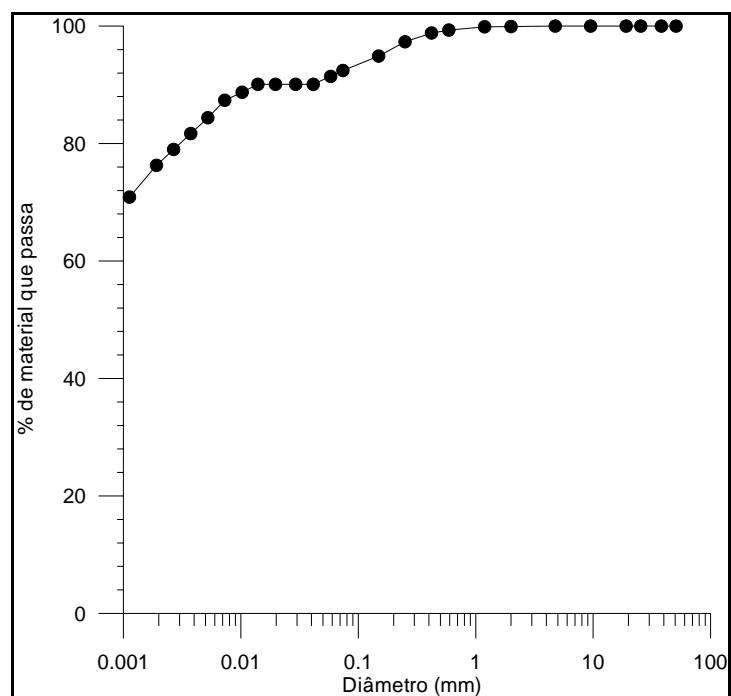


Figura A3 – Curva granulométrica para o solo da parcela de BM 7%

-BV 7%

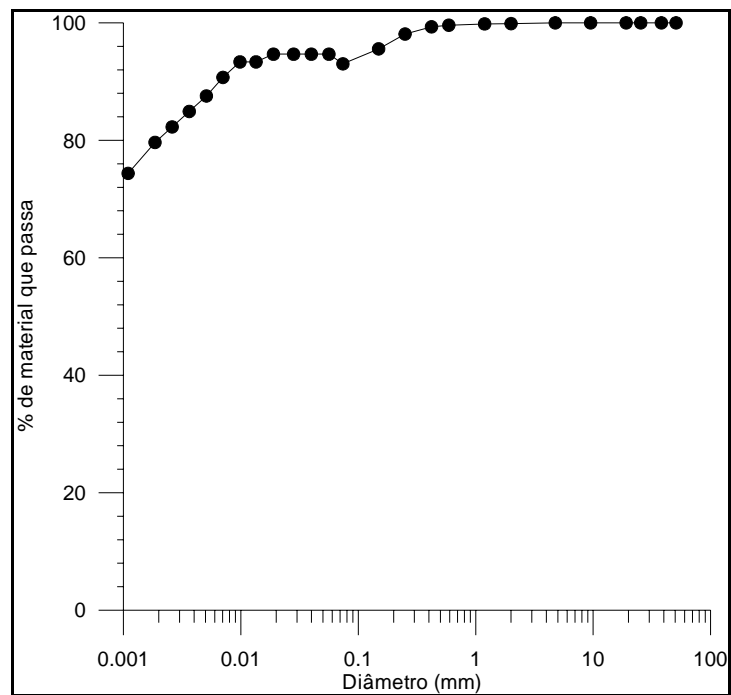


Figura A4 – Curva granulométrica para o solo da parcela de BV 7%

-BMBC 2%

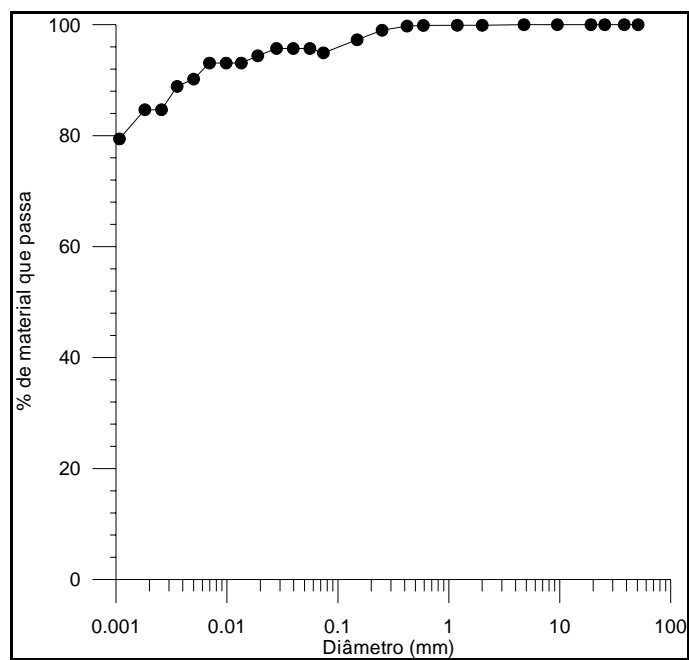


Figura A5 – Curva granulométrica para o solo da parcela de BMBC 2%

-BVBC 6%

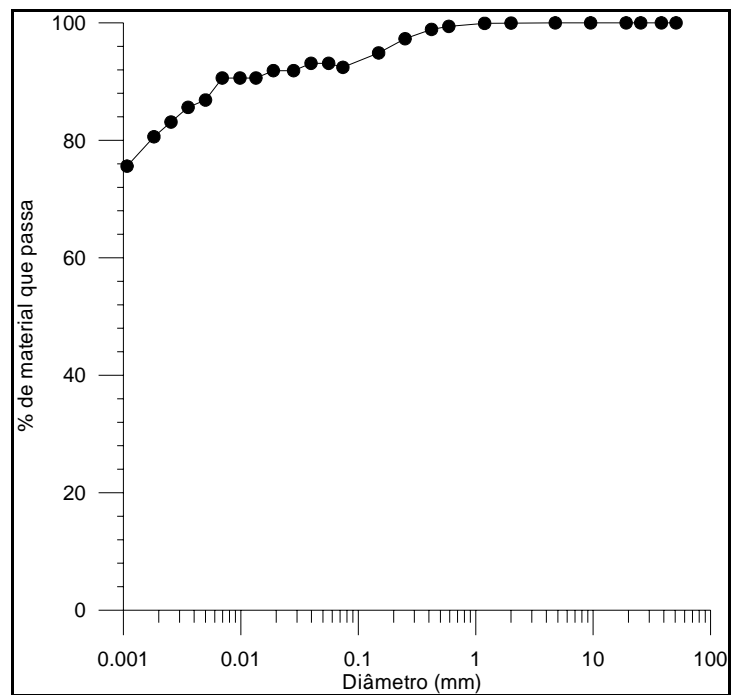


Figura A6 – Curva granulométrica para o solo da parcela de BVBC 6%

-BMBC 6% e BVBC 2%

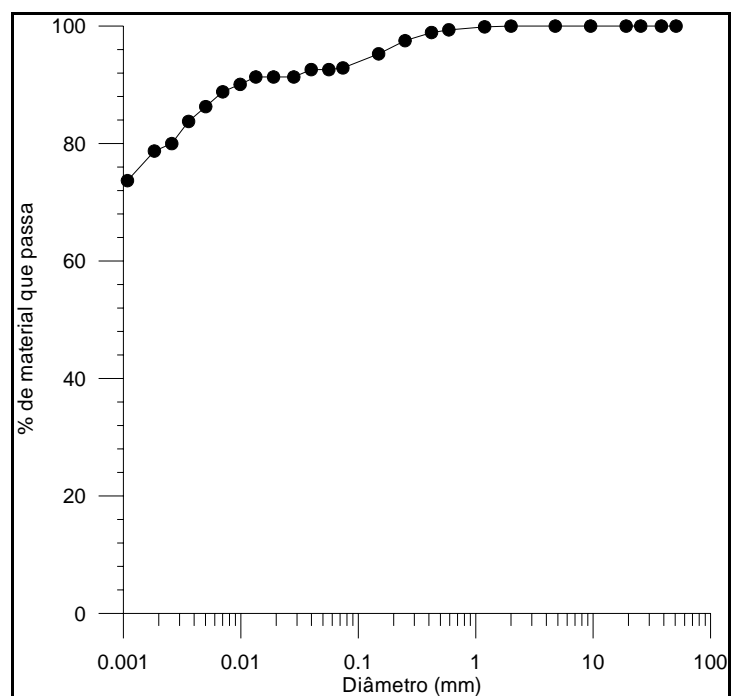


Figura A7 – Curva granulométrica para o solo das parcelas de BMBC 6% e BVBC 2%

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)