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

THIAGO QUINTILIANO DE CASTRO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Goiânia 2011

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

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

Área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Eduardo Queija de Siqueira, PhD.

Goiânia 2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP) GPT/BC/UFG

	011/20/010
C335a	Castro, Thiago Quintiliano de. Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis [manuscrito] / Thiago Quintiliano de Castro 2011. 91f. : il., figs, tabs.
	Orientador: Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2011. Bibliografia. Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas. Apêndices.
	1. Pavimentos permeáveis. 2. Controle do escoamento superficial. 3. Parâmetros de infiltração de Horton e de Green-Ampt. I. Título.
	CDU: 625.8

THIAGO QUINTILIANO DE CASTRO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia do Meio Ambiente – PPGEMA da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente, aprovada em 22 de setembro de 2011, pela banca examinadora:

Edundo Jueyo de

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

Prof. Dr. Antônio Carlos Zuffo - UNICAMP Examinador Externo

lutian R. de Reyende

Prof^a. Dr^a. Lilian Ribeiro Rezende - UFG Examinador Interno

T. M.

Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga - UFG Examinador Interno

A Deus Aos meus pais, meus irmãos e família

AGRADECIMENTOS

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

Ao meu orientador Professor Eduardo Queija de Siqueira, pela orientação, ensinamentos, conselhos e paciência ao longo de todas as etapas deste trabalho. E por ter dado a oportunidade de participar do projeto de pesquisa que gerou este trabalho.

À Professora Lilian Ribeiro Rezende e ao Professor Maurício Martines Sales, pelos ensinamentos, contribuições e definições nos trabalhos de investigação do solo, construção dos pavimentos e ensaios de campo.

Ao Professor Klebber Teodomiro Martins Formiga, pelos ensinamentos, auxílios e contribuições neste trabalho.

Ao Professor Antônio Carlos Zuffo, pela disponibilidade, prontidão e contribuições.

Ao colega Silvio Fagundes Sousa Junior, pela amizade, auxílio, dicas e contribuições.

À Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, pelo financiamento e custeio da maior parte deste trabalho. Assim como à Fundação de Apoio à Pesquisa – FUNAPE da UFG, pelo gerenciamento e controle dos recursos destinados a este trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

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

Ao Centro de Gestão do Espaço Físico – CEGEF da UFG, pela disponibilização de mão-deobra para a construção dos pavimentos.

Ao João Júnior, técnico do laboratório de solos, pela amizade, orientação, execução e auxílio nos trabalhos de laboratório e de campo.

Aos bolsistas de iniciação científica e tecnológica Bruna Ferreira de Almeida, Leonardo Cavalcante, Anna Carolina Monteiro e Sofia Leão, pelas ajudas e participações no trabalho.

À Joana D'Arc, técnica do laboratório de hidráulica, pelo auxílio, apoio e amizade.

À empresa Imperpizzo pela doação da manta geotêxtil utilizada na construção dos pavimentos.

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

RESUMO

CASTRO, T. Q. Avaliação do desempenho de pavimentos permeáveis. 2011. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2011.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho experimental de três tipos de pavimentos permeáveis construídos em três condições estruturais diferentes com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanizadas do município de Goiânia, Goiás, adequando-se às exigências legais e utilizando-se de materiais provenientes de fabricantes locais. Foram avaliadas nove parcelas experimentais de 3,2 m² conforme os seguintes tipos de revestimento: PAV - Bloco de concreto maciço tipo "paver", PCP - Placa de concreto poroso e CCG – Bloco de concreto vazado tipo "concregrama", e as seguintes condições estruturais: I - base de areia e subleito natural, II - base de areia e subleito compactado e III - base de areia, sub-base de brita tipo 1 e subleito compactado. Utilizando-se de um simulador de chuva artificial, foram realizados 18 ensaios com duas chuvas pré-definidas, uma de média intensidade (69 mm/h) e outra de alta intensidade (180 mm/h). Foram caracterizados o solo do subleito e os materiais de construção, medidos os escoamentos superficial e subsuperficial, bem como a umidade das camadas dos pavimentos. Os parâmetros dos modelos de Horton e de Green-Ampt foram obtidos por meio do ajuste dos dados calculados de taxa de infiltração. Os pavimentos PCP-II, PCP-III, CCG-II, CCG-III e PAV-III apresentaram pouco ou nenhum escoamento superficial. O retardo e o prolongamento nos tempos críticos do hidrograma de escoamento superficial também garantiram bons resultados ao revestimento PCP, que no geral apresentou os maiores tempos de embebição (7,2 a 30,4 minutos) em comparação aos demais tipos de revestimento. A estrutura que apresentou o melhor desempenho hidrológico foi o Trecho III, cujos resultados variaram de 0 a 0,19 para o coeficiente de escoamento. A análise dos resultados mostrou que os pavimentos permeáveis avaliados neste trabalho contribuem à redução do escoamento superficial, em razão dos baixos coeficientes de escoamento (0 a 0,36) obtidos, assim como ao armazenamento temporário de águas de chuva e ao incremento da infiltração de água no solo urbano. As diretrizes construtivas do tipo de pavimento permeável que obteve melhor desempenho foram traçadas e descritas.

Palavras-chave: Pavimentos permeáveis, controle do escoamento superficial, parâmetros de infiltração de Horton e de Green-Ampt.

ABSTRACT

CASTRO, T. Q. Experimental analysis of permeable pavements. 2011. 88 p. Monograph (Master's degree in Environmental Engineering) – Civil Engineering School, Universidade Federal de Goias, Goiania, 2011.

This study aimed to evaluate the experimental performance of three types of permeable pavements constructed in three different structural conditions in order to control runoff in urbanized areas of the city of Goiania, Goias, adapting to the legal requirements and using local manufactured materials. It was evaluated nine experimental plots of 3.2 m² as the following types: PAV - concrete block "paver", PCP - porous concrete plate and GCC concrete block "concregrama" and the following structural conditions: I - base of sand and natural subgrade, II - base of sand and compacted subgrade and III - base of sand, gravel subbase and compacted subgrade. Using an artificial rain simulator, 18 tests were performed with two pre-defined rain, a medium intensity (69 mm / h) and a high intensity (180 mm / h). The subgrade soil and building materials were characterized, measured the surface and subsurface runoff, and moisture of the layers of the pavement. The parameters of the models of Horton and Green-Ampt were obtained by adjusting the calculated data infiltration. Combinations PCP-II, PCP-III, II-CCG, CCG-III and PAV-III showed little or no runoff. The delay and persistence in critical times of the runoff hydrograph also secured good results to the PCP, which generally showed higher soaking times (7,2 to 30,4 minutes) compared to the other types of pavement. The structure that showed the best hydrological performance was the III, whose results ranged from 0 to 0,19 for the runoff coefficient. The results showed that porous pavements evaluated in this study contribute to the reduction of runoff, because of low runoff coefficients (0 to 0,36) obtained. Constructive guidelines on the type of permeable pavement that performed better were drawn and described.

Key-words: Permeable pavements, surface runoff control, infiltration parameters of Horton and Green-Ampt.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de usos de pavimentos permeáveis no município de Goiânia. (A)
Calçamento da pista de caminhada do Parque Zoológico de Goiânia, (B) Estacionamento de
estabelecimento comercial, (C) Calçamento de estabelecimento comercial e (D)
Estacionamento do Clube de Engenharia de Goiânia - Go
Figura 2 – Principais processos de um sistema hidrológico (adaptado de Viessman Jr e Lewis,
1996)
Figura 3 – Hidrograma típico (adaptado de Tucci, 2002). Em que: Q é a vazão; P é a
precipitação; P(t) é a precipitação por unidade de tempo; tc é o tempo de concentração; tp é o
tempo de pico e tm é o tempo de ascensão
Figura 4 – Curva de infiltração típica (BOUVIER, 1990 apud GENZ, 1994). Em que: i(t) é a
intensidade da chuva no tempo t_u , Q(t) a vazão de escoamento, F(t_u) a curva da taxa de
infiltração, L(t) a lâmina total escoada, W(t) a lâmina total infiltrada e S(t) a lâmina total
armazenada na superfície
Figura 5 – Seção da estrutura típica de um pavimento permeável (adaptado de Scholz e
Grabowiecki, 2007)
Figura 6 – Exemplos de pavimentos permeáveis com blocos de concreto intertravados. (A)
Estacionamento em Faculdade de Ilinois e (B) Rua residencial em Portland, Oregon (SMITH,
2006)
Figura 7 - Simulador de chuva artificial. (A) Detalhe dos aspersores de água em
funcionamento (adaptado de SOUSA JUNIOR, 2011)
Figura 8 – Instalação dos sensores de umidade nas parcelas experimentais. (A) Placas de
concreto poroso, (B) Blocos de concreto maciço tipo "paver" e (C) Blocos de concreto vazado
tipo "concregrama"
Figura 9 – Resultados de calibração dos sensores barométricos de nível d'água
Figura 10 – Equipamento do método DCP utilizado na camada de subleito das parcelas
experimentais. (A) Detalhe do peso e régua graduada
Figura 11 – Prova de carga estática durante execução. (A) Caminhão carregado com 8200 kg.
(B) Detalhe do cilindro de elevação hidráulica. (C) Detalhe dos sensores de deslocamento41
Figura 12 – Perfil esquemático das seções nas três condições experimentais
Figura 13 - Etapas de construção dos pavimentos permeáveis em parcelas experimentais47
Figura 14 – Revestimentos utilizados na construção das parcelas experimentais em
pavimentos permeáveis. (A) bloco de concreto pré-moldado vazado do tipo "concregrama";
(B) placa de concreto poroso e (C) bloco de concreto pré-moldado maciço do tipo "paver"48
Figura 15 – Desenho esquemático do quadro metálico de delimitação da parcela amostral e
dos reservatórios subterrâneos (Sofia Leão, 2011)
Figura 16 – Gráfico da análise granulométrica da amostra de solo do subleito (escala
logarítmica)
Figura 17– Gráfico resultado do ensaio de compactação para a amostra de solo51
Figura 18 – Gráficos de determinação do CBR - California Bearing Ratio (A) e
Expansibilidade (B)
Figura 19 - Diagramas estruturais (método DCP) do subleito dos Trechos I, II e III
Figura 20 – Diagramas estruturais (método DCP) dos pavimentos nos Trechos II e III55
Figura 21 - Escoamento superficial e infiltração nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação
de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos57
Figura 22 – Ajustes dos dados de infiltração nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de
chuva de 180 mm/h durante 15 minutos
Figura 23 – Evolução da saturação do solo nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de
chuva de 180 mm/h durante 15 minutos
Figura 24 - Escoamento superficial e infiltração nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação
de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos61

Figura 25 - Ajustes dos dados de infiltração nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de
chuva de 69 mm/h durante 45 minutos
Figura 26 – Evolução da saturação do solo nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de
chuva de 69mm/h durante 45 minutos
Figura 27 - Escoamentos superficial, subsuperficial e infiltração nos PAV-II, PCP-II e CCG-II
para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos
Figura 28 – Ajustes dos dados de infiltração nos PAV-II para a simulação de chuva de 180
mm/h durante 15 minutos
Figura 29 – Evolução da saturação do solo nos PAV-II, PCP-II e CCG-II para a simulação de
chuva de 180 mm/h durante 15 minutos67
Figura 30 - Escoamentos superficial, subsuperficial e infiltração nos PAV-II, PCP-II e CCG-II
para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos
Figura 31 – Ajustes dos dados de infiltração no PAV-II para a simulação de chuva de 69
mm/h durante 45 minutos
Figura 32 – Evolução da saturação do solo nos PAV-II, PCP-II e CCG-II para a simulação de
chuva de 69 mm/h durante 45 minutos70
Figura 33 - Escoamentos superficial, subsuperficial e infiltração nos PAV-III, PCP-III e CCG-
III para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos72
Figura 34 – Ajustes dos dados de infiltração no PAV-III para a simulação de chuva de 180
mm/h durante 15 minutos73
Figura 35 – Evolução da saturação do solo nos PAV-III, PCP-III e CCG-III para a simulação
de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos74
Figura 36 - Escoamento subsuperficial nos PAV-III, PCP-III e CCG-III para a simulação de
chuva de 69 mm/h durante 45 minutos75
Figura 37 – Evolução da saturação do solo nos PAV-III, PCP-III e CCG-III para a simulação
de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos76
Figura 38 – Curvas da prova de carga estática sobre os pavimentos permeáveis na condição I.
Figura 39 – Aparência dos revestimentos dos pavimentos após a execução dos ensaios de
prova de carga estática. (A) Afundamento da estrutura do pavimento – PAV; (B) Rachaduras
transversais - PAV; (C) Afundamento da estrutura do pavimento PCP
Figura 40 – Estrutura e dimensões do pavimento permeável recomendado

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intensidades máximas de chuva calculadas de acordo com o método i-d-f ajustado	
para o município de Goiânia - Go	1
Tabela 2 – Intensidades médias para as duas condições de calibração do simulador de chuvas artificiais	5
Tabala 3 Encaios a normas da referência para as amostras da solo, araja a brita 30	י נ
Tabela 4 – Traches e respectives condições de construção dos povimentos	, ,
Tabela 4 – Trechos e respectivas condições de construção dos pavimentos42)
Tabela 5 – Frações de argila, silte, areias e pedregulho contidas na amostra de solo, com e	
sem o uso de defloculante)
Tabela 6 - Massa específica dos grãos e limites de consistência do solo do subleito. 51	L
Tabela 7 – Coeficientes de escoamento e volumes acumulados obtidos dos ensaios	
experimentais77	1
Tabela 8 – Média, desvio padrão, intervalos de confiança (IC) e valor de p das variáveis:	
coeficiente de escoamento, volume total de escoamento superficial e volume total de	
infiltração, por tipo de revestimento	3
Tabela 9 – Média, desvio padrão, intervalos de confianca (IC) e valor de p das variáveis:	
coeficiente de escoamento, volume total de escoamento superficial, volume total de	
infiltração volume total de escoamento subsuperficial volume total armazenado no	
navimento, por estrutura	נ
Tabala 10 Vazão da nice e fesse dos energios experimentais	'n
Tabela 10 – Vazao de pico e lases dos ensaios experimentais	1
Tabela 11 – Media, Desvio Padrao e Intervalo de Confiança da media da vazao de pico (Qp) e	2
de cada tempo (te, tp e tf), por tipo de revestimento)
Tabela 12 – Parâmetros do ajuste dos dados de infiltração ao modelo de Horton para as	
parcelas experimentais	l
Tabela 13 – Parâmetros do ajuste dos dados de infiltração ao modelo de Green-Ampt para as	
parcelas experimentais	l

APÊNDICE A

REGISTROS DOS ENSAIOS DE SIMULAÇÃO DE CHUVAS SOBRE OS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Tabela A-1 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 180 mm/h e duração de 15 minutos sobre o PAV-I, realizado no dia 8/7/2011. Tabela A-2 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos sobre o PAV-I, realizado no dia 14/4/2011.

Tabela A-3 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 180 mm/h e duração de 15 minutos sobre o PAV-II, realizado no dia 24/6/2011.

Tabela A-4 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos sobre o PAV-II, realizado no dia 29/4/2011.

Tabela A-5 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 180 mm/h e duração de 15 minutos sobre o PAV-III, realizado no dia 14/5/2011.

Tabela A-6 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos sobre o PAV-III, realizado no dia 16/5/2011.

Tabela A-7 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 180 mm/h e duração de 15 minutos sobre o PCP-I, realizado no dia 7/4/2011.

Tabela A-8 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos sobre o PCP-I, realizado no dia 4/4/2011.

Tabela A-9 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 180 mm/h e duração de 15 minutos sobre o PCP-II, realizado no dia 22/6/2011. Tabela A-10 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos sobre o PCP-II, realizado no dia 4/5/2011.

Tabela A-11 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 180 mm/h e duração de 15 minutos sobre o PCP-III, realizado no dia 18/5/2011.

Tabela A-12 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos sobre o PCP-III, realizado no dia 23/5/2011. Tabela A-13 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 180 mm/h e duração de 15 minutos sobre o CCG-I, realizado no dia 2/4/2011.

Tabela A-14 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos sobre o CCG-I, realizado no dia 3/4/2011.

Tabela A-15 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 180 mm/h e duração de 15 minutos sobre o CCG-II, realizado no dia 10/5/2011.

Tabela A-16 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos sobre o CCG-II, realizado no dia 12/5/2011. Tabela A-17 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 180 mm/h e duração de 15 minutos sobre o CCG-III, realizado no dia 25/5/2011.

Tabela A-18 – Registros e parâmetros hidrológicos do ensaio de simulação de chuva com intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos sobre o CCG-III, realizado no dia 27/5/2011.

APÊNDICE B

REGISTROS DO MÉTODO DCP (DYNAMIC CONE PENETROMETER)

Figura B-1 – Gráfico dos registros do método DCP - camada de subleito do Trecho I.

Figura B-2 - Gráfico dos registros do método DCP - camada de subleito do Trecho II.

Figura B-3 – Gráfico dos registros do método DCP – camada de subleito do Trecho III.

Figura B-4 – Gráfico dos registros do método DCP - estrutura do pavimento (base e subleito) do Trecho II.

Figura B-5 – Gráfico dos registros do método DCP - estrutura do pavimento (base, sub-base e subleito) do Trecho III.

Tabela B-1 – Profundidades, espessuras e índice de penetração das camadas após a execução do método DCP sobre o solo do subleito dos Trechos I, II, III.

Tabela B-2 – Profundidades, espessuras e índice de penetração das camadas após a execução do método DCP sobre a estrutura dos pavimentos (base, sub-base e subleito) dos Trechos II e III.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- α , β , γ , δ parâmetros regionais constantes da curva i-d-f
- B, b, c parâmetros da curva i-d-f que descrevem características locais
- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANOVA análise de variância
- ASTM American Society for Testing and Materials
- CBR California Bearing Ratio
- CCG bloco de concreto pré-moldado vazado do tipo "concregrama"
- C coeficiente de escoamento superficial
- CV coeficiente de variação
- DCP Dynamic Cone Penetrometer
- D_m detenção móvel de água da superfície
- D_r detenção de água superficial recuperável do escoamento
- E-evaporação
- ET evapotranspiração
- F(t) curva da taxa de infiltração
- i intensidade de chuva
- i-d-f intensidade, duração e frequência
- $I_{(t)}$ capacidade de infiltração no instante t
- If capacidade de infiltração final
- Io capacidade de infiltração inicial
- IP índice de plasticidade
- K constante de decaimento da capacidade de infiltração (Modelo de Horton)
- K coeficiente de permeabilidade
- L(t) lâmina total de água escoada
- n número de amostras
- NBR Norma Brasileira da ABNT
- P precipitação
- p valor estatístico resultado da ANOVA
- ΔS variação do volume total de água no sistema
- PAV Bloco de concreto pré-moldado maciço do tipo "paver"
- PCP Placa de concreto poroso pré-moldado
- PDMG Plano Diretor do Município de Goiânia
- PEAD polietileno de alta densidade

- PVC policloreto de vinil
- Q esc vazão de escoamento superficial
- Q inf vazão de infiltração no pavimento
- Q base vazão de escoamento subsuperficial
- Q_p-vazão de pico
- R escoamento superficial
- R_g escoamento subsuperficial
- R² coeficiente de determinação
- SCS Soil Conservation Service
- SPSS Statistical Package for the Social Sciences
- S_R grau de saturação relativo
- S(t) lâmina total de água armazenada na superfície
- t tempo
- t_c tempo de concentração
- t_e tempo de embebição
- t_p tempo de pico
- t_f tempo decorrido do início da precipitação ao final do escoamento superficial
- t_m-tempo de ascenção
- t_u-duração da chuva
- T período de retorno
- Ta tempo de abertura
- Tf tempo de fechamento
- σ desvio padrão
- V prec volume de precipitação acumulado
- V esc volume de escoamento superficial acumulado
- V inf volume de infiltração acumulado
- V base volume de escoamento subsuperficial acumulado
- V arm volume de armazenamento acumulado no pavimento
- W umidade
- wL limite de liquidez
- wP limite de plasticidade
- W(t) lâmina total de água infiltrada
- γ_g peso específico dos grãos
- γ_a peso específico da água
- ρ massa específica dos grãos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Processos Hidrológicos	21
3.2	Pavimentos permeáveis	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	Cálculo das intensidades de chuva	33
4.2	Simulação de chuva	34
4.3	Monitoramento da umidade dos pavimentos	36
4.4	Medição dos escoamentos	37
4.5	Caracterização do solo, materiais e pavimentos	39
4.6	Dimensionamento e construção dos pavimentos permeáveis	42
4.7	Análise estatística	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1	Caracterização do solo, materiais e pavimentos	50
5.2	Ensaios com os pavimentos permeáveis	55
5.2.1	Parcelas nas condições do TRECHO-I	56
5.2.2	Parcelas nas condições do TRECHO-II	64
5.2.3	Parcelas nas condições do TRECHO-III	70
5.3	Prova de carga estática	82
6.	DIRETRIZES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS PERMEÁVEIS	83
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	85
REFE	ERÊNCIAS	87

1 INTRODUÇÃO

A expansão urbana nos países em desenvolvimento é resultado notório do crescimento e adensamento populacional, o que gera alterações e impactos negativos nas condições originais de infiltração e escoamento de água nas superfícies das áreas urbanas. Os vales, baixadas e margens de cursos hídricos, que são as cotas mais baixas, são os locais mais frequentemente afetados por alagamentos e enchentes durante a época de chuvas, pelo fato de receberem grandes volumes de água proveniente do escoamento superficial.

A principal intervenção da expansão urbana é a ocupação de novas áreas que implica primariamente na alteração do uso do solo. Segundo Costa *et al.* (2007), "à medida que a cidade vai crescendo, ocorrem proliferações de loteamentos sem planejamento adequado, aumentando a ocupação de áreas de risco impróprias para construções como margens de córregos, várzeas e áreas de declividade acentuada", que contribui para a impermeabilização de novas áreas.

Neste contexto, como consequência do rápido crescimento urbano, os principais impactos diretos são as enchentes e inundações de áreas urbanas e ribeirinhas. Como impactos indiretos ocorrem assoreamentos dos canais de drenagem, rios e lagos urbanos, transporte de substâncias poluentes agregadas ao sedimento, dentre outros (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995). Consequentemente, os prejuízos também estão relacionados ao comprometimento da qualidade da água e do solo, especialmente em áreas urbanas.

Os principais prejuízos econômicos e sociais provenientes dos impactos citados estão relacionados a danos e perdas materiais, como veículos, casas, edificações, pontes e estradas, que por sua vez geram prejuízos à comunidade atingida, como a falta de água potável e energia elétrica, interrupção de acessos e meios de transporte, pessoas desabrigadas e aparecimento de doenças veiculadas pela água.

Atualmente em Goiânia, capital do Estado de Goiás, há registros e evidências de problemas relacionados à drenagem urbana como enchentes e inundações provocadas pela redução dos processos de infiltração, aumento dos volumes de escoamento superficial e acentuação dos picos de cheia (MENEZES FILHO, 2007), que estão associados à crescente urbanização e impermeabilização das superfícies.

A cidade de Goiânia apresenta um alto índice de impermeabilização da área urbana inferindo em frequentes eventos de inundação, sofrendo com perdas de infra-estrutura física, prejuízos à saúde humana e mortandade. Em um levantamento realizado em 10 lotes residenciais da região central de Goiânia (SILVA, 2007), obteve-se a média de 86% de impermeabilização da área total dos lotes.

O rápido processo de crescimento demográfico, ocorrido especialmente a partir da década de 1960 e a expansão urbana desordenada resultaram em sérios problemas ambientais, dentre os quais pode-se destacar a retirada da cobertura vegetal original, a poluição dos corpos d'água, principalmente os que drenam a malha urbana, não tratamento dos esgotos industriais e domésticos, processos de assoreamento com a proliferação de áreas de risco e frequentes alagamentos das vias dentro da malha urbana (ARRAIS, 2004¹).

De acordo com a Defesa Civil de Goiânia, o município possui mais de 330 famílias em áreas de risco e cerca de 1200 pessoas vivem em áreas já catalogadas como instáveis. Em abril de 2010, foram 17 os pontos de alagamento registrados após as últimas chuvas do mês março (Diário da Manhã, 2010).

Existem diversas técnicas e medidas que visam à mitigação dos efeitos da impermeabilização das superfícies urbanas, tais como: diminuir os picos de cheia e os volumes totais de escoamento superficial, aumentar o tempo de concentração e possibilitar o reabastecimento do lençol freático. Dentre essas técnicas, pode-se citar: (1) micro-reservatórios domiciliares; (2) pavimentos permeáveis; (3) bacias de detenção e retenção; (4) trincheiras de infiltração; (5) poços de infiltração e (6) estações de bombeamento (*polders*) (TUCCI, PORTO e BARROS, 1995; CANHOLI, 2005; COSTA et al., 2007).

Neste trabalho foi dada ênfase aos pavimentos permeáveis utilizados na região de Goiânia e em grande parte do país para diversas finalidades. A Figura 1 apresenta exemplos ilustrados de aplicação de dois tipos de pavimentos permeáveis em calçadas e estacionamentos de áreas urbanas no município de Goiânia.

O Plano Diretor Municipal de Goiânia - PDMG (GOIÂNIA, 2007) estimula o uso de medidas compensatórias de drenagem, tais como: bacias de detenção e micro-reservatórios. O PDMG prevê em seu artigo 14, inciso V, alínea f, a implantação de um programa visando incentivar e estimular o aumento das áreas permeáveis na malha urbana de Goiânia.

Da mesma forma, o artigo 103, inciso IV do PDMG, institui como instrumento normativo da ocupação e do aproveitamento do solo o "Índice de Permeabilidade" que é definido como sendo "a parcela mínima de solo permeável do lote destinada à infiltração de água, com a função principal de realimentação do lençol freático como um dos instrumentos normativos que determinam a ocupação e o aproveitamento máximo do solo". No artigo 128, fica estabelecido o Índice de Permeabilidade mínimo de 15% (quinze por cento) da área do terreno, para todos os lotes e glebas da Macrozona Construída.

¹ARRAIS, T. A. Geografia contemporânea de Goiás. Goiânia: Vieira, 2004.

Bloco de concreto pré-moldado maciço do tipo "paver"

Bloco de concreto pré-moldado vazado do tipo "concregrama"



Figura 1 – Exemplos de usos de pavimentos permeáveis no município de Goiânia. (A) Calçamento da pista de caminhada do Parque Zoológico de Goiânia, (B) Estacionamento de estabelecimento comercial, (C) Calçamento de estabelecimento comercial e (D) Estacionamento do Clube de Engenharia de Goiânia - Go.

O Decreto (GOIÂNIA, 20__)² que pretende regulamentar o controle da drenagem urbana no município de Goiânia trata-se de uma normativa exigida pelo PDMG que atualmente se encontra em discussão e elaboração. No parágrafo 2º do artigo 6º da minuta do Decreto prevê-se que a utilização de pavimentos permeáveis poderá ser aplicada na contabilização de área permeável para efeito de cálculo da vazão máxima de saída de águas pluviais para a rede pública.

Esta previsão é uma indicação de avanço nas alternativas atuais de uso do solo urbano em Goiânia. No entanto, são necessárias mais informações com relação às formas de utilização e construção dos pavimentos permeáveis. A grande e rápida demanda por essas medidas, por parte dos empreendedores, prefeitura e construtoras, requer diretrizes tecnológicas para orientar o uso adequado dessas estruturas nas diversas finalidades propostas, de acordo com os padrões nacionais e internacionais.

Apesar dos incentivos e estímulos previstos no PDMG e na minuta do Decreto de regulamentação da drenagem urbana em Goiânia, não existem recomendações e critérios técnicos para o uso de pavimentos permeáveis. O Departamento Municipal responsável por

² GOIÂNIA, GO. Decreto n°__, de__ de 20__ (Em fase de elaboração). Regulamenta o controle da drenagem urbana no Município de Goiânia, GO.

regulamentar e fiscalizar obras urbanas também não oferece diretrizes construtivas nem tanto orientações de projeto para essa tecnologia.

As pesquisas com estruturas de armazenamento e infiltração de águas pluviais são ainda insipientes no Brasil. Embora existam na literatura inúmeros estudos sobre medidas compensatórias de drenagem, poucos são os sistemas construídos e avaliados em seu desempenho.

Em outros países a contribuição científica sobre o assunto é vasta, mas de aplicação limitada às regiões estudadas devido às diferentes condições de clima, solo e materiais utilizados na construção dos pavimentos.

Diante disso, o presente trabalho propõe contribuir para o fornecimento de informações e diretrizes de uso de pavimentos permeáveis, investigar diferentes tecnologias, materiais de origem local e os seus benefícios na utilização em áreas urbanas para o município de Goiânia, com ênfase ao controle do escoamento superficial e ao incremento da infiltração de águas pluviais no solo.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho de diferentes tipos de pavimento permeável com vistas ao controle do escoamento superficial e ao incremento da infiltração de água no solo das áreas urbanas para a cidade de Goiânia.

Os objetivos específicos foram:

- Obter e comparar os coeficientes de escoamento e infiltração de três tipos de pavimento permeável e três condições estruturais;
- 2) Selecionar a estrutura que oferece melhor desempenho hidrológico e mecânico;
- Apresentar diretrizes construtivas e parâmetros para a escolha e dimensionamento dos tipos de pavimento permeável experimentados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos Hidrológicos

O ciclo hidrológico é um fenômeno complexo composto por diversos processos hidrológicos interligados e que ocorrem de forma contínua na natureza, como a evaporação, evapotranspiração, precipitação, interceptação, armazenamento na superfície, infiltração, escoamento superficial, escoamento subsuperficial, percolação subterrânea que alimenta os cursos d'água superficiais e recarga do aquífero (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1994).

Neste estudo, utilizou-se como base o conceito de sistema hidrológico, que é definido pelos mesmos autores como uma estrutura delimitada que permite a entrada, movimentação interna e saída de água. A Figura 2 apresenta esquematicamente o fluxograma dos principais processos hidrológicos de um sistema a partir da precipitação.



Figura 2 – Principais processos de um sistema hidrológico (adaptado de Viessman Jr e Lewis, 1996).

Em um sistema hidrológico há o balanço de massas entre entradas, saídas e movimentações de água que pode ser representado matematicamente em equações genéricas (VIESSMAN JR e LEWIS, 1996). A seguir é apresentada a equação genérica de balanço de massas que ocorre em um sistema hidrológico, em que P representa a precipitação, R o escoamento superficial, I a infiltração, R_g o escoamento subsuperficial, E a evaporação e ET a evapotranspiração através das plantas. ΔS é a variação do volume de água armazenada no solo.

$$P - R - I - R_{\rho} - E - ET = \Delta S$$
 (Equação 1)

A Equação 1 é a equação básica de representação do balanço de volumes totais em um sistema hidrológico. Para um sistema simplificado, onde a evaporação (E) e a evapotranspiração (ET) são pouco significativas, temos:

$$P - R - I - R_g = \Delta S \tag{Equação 2}$$

Os principais processos hidrológicos a serem analisados neste estudo são a precipitação, o escoamento superficial, a infiltração e o escoamento subsuperficial. A evaporação e a evapotranspiração não foram consideradas devido a curta duração dos eventos ensaiados e dos pequenos volumes de água envolvidos na experimentação.

A precipitação é o processo primário de entrada de água em um sistema hidrológico que pode ser entendida como toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Uma das maneiras de se determinar chuvas de projeto é a partir da curva de intensidade-duração-frequência (i-d-f). As curvas i-d-f, também conhecidas como equações de chuva, estabelecem a relação entre a intensidade e a duração da precipitação e seu período de retorno, que é o intervalo de tempo estimado para um determinado evento se repetir (TUCCI, 2002).

O escoamento superficial pode ser entendido como o excesso de precipitação que se transforma em escoamento após se acumular e encontrar um caminho preferencial na superfície. Ou seja, é a quantidade de água de chuva que não é retida na superfície terrestre e nem se infiltra no solo (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1994). O escoamento superficial ocorre somente quando a água precipitada promove o encharcamento do solo ou superfície, quando se poderá observar o início da formação de lâmina d'água. A razão entre o volume de água escoado superficialmente e o precipitado é denominado de coeficiente de escoamento (Equação 3), que varia de 0 a 1.

$$C = \frac{Ve}{Vp}$$
(Equação 3)

O escoamento subsuperficial é uma fração da água retida e infiltrada no solo que escoa através dos espaços vazios dentro do solo e alimenta o lençol freático, camada do solo que armazena e conduz a água subterrânea aos cursos d'água, nascentes e lagos. Neste trabalho, considerou-se escoamento subsuperficial a fração de água que infiltrou através dos revestimentos do pavimento e foi escoada pelo dreno de fundo das parcelas experimentais.

A Figura 3 apresenta graficamente o comportamento típico de um hidrograma de escoamento superficial após a ocorrência de uma sequência de precipitações. Os principais componentes de caracterização do hidrograma são relacionados a seguir:

 Tempo de pico (*tp*) – é o intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo da vazão máxima;

- Tempo de concentração (tc) é o tempo necessário para a água precipitada deslocar-se até a seção principal. É definido também como o tempo entre o fim da precipitação e o ponto de inflexão do hidrograma;
- 3) Tempo de ascensão (tm) é o tempo entre o início da chuva e o pico do hidrograma;
- Tempo de base (*tb*) é o tempo total entre o início da precipitação e aquele em que a precipitação ocorrida já escoou através da seção principal.



Figura 3 – Hidrograma típico (adaptado de Tucci, 2002). Em que: Q é a vazão; P é a precipitação; P(t) é a precipitação por unidade de tempo; tc é o tempo de concentração; tp é o tempo de pico e tm é o tempo de ascensão.

A infiltração é o processo de transferência da água da superfície para o interior do solo, que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes no seu interior. A capacidade de infiltração é a quantidade máxima de água que um solo pode absorver, em termos de lâmina por unidade de tempo, enquanto que a taxa de infiltração é a quantidade real de água infiltrada no solo, em lâmina por unidade de tempo. Neste caso, a taxa de infiltração pode igualar-se à capacidade de infiltração quando a precipitação for superior à capacidade de infiltração (TUCCI, 2002).

A Figura 4 apresenta graficamente o comportamento típico da infiltração de água no solo em comparação ao hidrograma de escoamento superficial após a ocorrência de uma precipitação de intensidade constante e suficientemente longa sobre uma determinada área. As quatro fases de caracterização do gráfico são descritas a seguir (BOUVIER, 1990³ *apud* GENZ, 1994):

³ BOUVIER, C. Concerning experimental measurements of infiltration for runoff modelling of urban watersheds in western Africa. International Association of Hydrological Sciences. Wallingford, UK: IAHS Press. 1990.

- Tempo de embebição (t_e) é a duração da fase de embebição, que compreende o tempo entre o início da precipitação e o início do escoamento superficial. Durante essa fase, as perdas são iguais ao volume de água precipitado;
- 2) Regime transitório essa fase é compreendida entre o início do escoamento superficial e o pico da vazão deste escoamento. Os valores da intensidade do escoamento Q(t) são resultantes da superposição de três fenômenos: a diminuição contínua da intensidade de infiltração F(t), o aumento da altura média da lâmina de água em movimento na superfície D_m(t) e o aumento do armazenamento na superfície S_i(t);
- Regime permanente é a fase em que o escoamento superficial se estabiliza em uma intensidade constante Q_x, que corresponde à vazão de pico do escoamento. Nessa fase o sistema está em equilíbrio e as perdas ocorrem somente devido à infiltração de base;
- 4) Esvaziamento esta fase corresponde ao esvaziamento da detenção móvel da superfície D_m após o final da duração da chuva t_u . A duração da fase t_r corresponde ao tempo decorrido entre t_u e o fim do escoamento superficial t_f . D_r é a dentenção superficial recuperável do escoamento.



Figura 4 – Curva de infiltração típica (BOUVIER, 1990 *apud* GENZ, 1994). Em que: i(t) é a intensidade da chuva no tempo t_u , Q(t) a vazão de escoamento, F(t_u) a curva da taxa de infiltração, L(t) a lâmina total escoada, W(t) a lâmina total infiltrada e S(t) a lâmina total armazenada na superfície.

A taxa de infiltração de água em um solo é função de: (1) condição de permeabilidade na superfície do solo; (2) tipo e extensão da cobertura vegetal; (3) temperatura na superfície do solo; (4) intensidade da chuva; (5) qualidade da água; e (6) propriedades do solo como porosidade, condutividade hidráulica e conteúdo de umidade (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1994 e VIESSMAN JR e LEWIS, 1996). Como a taxa de infiltração está diretamente relacionada à vazão de escoamento superficial, este último também é afetado por esses fatores, que por sua vez interferem no coeficiente de escoamento.

Os métodos mais usados para se medir a taxa de infiltração de água no solo são com o uso de infiltrômetros e simuladores de chuva. Neste estudo foi utilizado um simulador de chuva que possibilita aplicar intensidades de chuva pré-definida. E com os dados medidos e calculados da taxa de infiltração, foi feito o ajuste ao modelo de Horton e de Green-Ampt para representar matematicamente o processo de infiltração nas superfícies avaliadas.

A opção pelo modelos de Horton e de Green-Ampt foi função da facilidade de utilização a partir de dados observados em campo e da ampla utilização de seus parâmetros em algoritmos para a determinação de precipitação efetiva em modelos de simulação do tipo chuva-vazão.

O modelo de infiltração de Horton apresenta três parâmetros para a determinação da capacidade de infiltração de água no solo ao longo do tempo, conforme apresentado na Equação 4 (HORTON, 1939⁴ *apud* TUCCI, 2002).

$$I_{(t)} = I_f + (I_o - I_f) e^{-Kt}$$
 (Equação 4)

em que,

 $I_{(t)}$ = capacidade de infiltração no instante t (mm/h);

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

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

K =constante de decaimento da capacidade de infiltração (h⁻¹);

t = tempo (h).

Por se tratar de um modelo que determina a capacidade de infiltração, o modelo de Horton só pode ser aplicado em condições de intensidade de precipitação superior a capacidade de infiltração do solo ou superfície. Os parâmetros I_{fi} , I_o e K devem ser determinados a partir do ajuste de dados observados em campo.

⁴ HORTON, R. E. Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration capacity. Transactions American Geophysical Union, Washington, p. 693-711, 1939.

O modelo de Green-Ampt (GREEN e AMPT, 1911^5 *apud* TUCCI, 2002) foi desenvolvido com base na equação de Darcy e em algumas premissas, como a existência de uma carga hidráulica constante na superfície do solo durante todo o processo de infiltração; a umidade na zona de transmissão (θ i) atinge a saturação (θ s); assim, a condutividade hidráulica nesta zona (K_t) equivale à condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e a formação de uma frente de umedecimento nítida e precisamente definida, sendo o potencial matricial nesta frente relativo à umidade inicial do solo (ψ) e, com isso, a água penetra no solo abruptamente, resultando na formação de duas regiões bem definidas, em que a primeira contém o teor de água do solo saturado (θ s) e a segunda o teor de água igual ao que possuía antes do início do processo (θ i) caracterizando o denominado movimento tipo pistão.

$$I = K_0 (1 + \frac{\Psi(\theta s - \theta i)}{V f})$$
 (Equação 5)

em que:

I = taxa de infiltração da água no solo (mm/h);

 K_0 = condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h);

 ψ = potencial matricial médio na frente de umedecimento (mm);

 θ s = umidade do solo na saturação (cm³/cm³);

 θ i = umidade inicial do solo (cm³/cm³);

Vf = infiltração acumulada (mm).

3.2 Pavimentos permeáveis

De uma maneira geral, os pavimentos permeáveis recebem denominações diversas, mas todas com referência a estruturas com a função de permitir a penetração de água através da superfície, o armazenamento temporário de água e a percolação de água no solo, com o propósito de contribuírem para a redução do escoamento superficial e o incremento da infiltração de água no solo em áreas urbanizadas. As terminologias mais frequentemente encontradas na literatura são: pavimentos permeáveis (*permeable pavements*) e pavimentos porosos (*porous pavements*).

De acordo com Pratt (1997)⁶ *apud* Wright e Heaney (2004), os pavimentos porosos distinguem-se dos pavimentos permeáveis. Os pavimentos porosos permitem infiltração através de toda a superfície do material que são fabricados com material poroso. Já

⁵ GREEN, W.H.; AMPT, G.A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Science, Cambridge, v.4, n.1, p.1-24, 1911.

⁶ PRATT, C. J. Design guidelines on porous/permeable pavements. In: Sustaining urban Water Resources in the 21st. Century – Proceedings of a Engineering Foundation Conference. Malmo, Sweden, 1997.

os pavimentos permeáveis são fabricados com material impermeável, mas são construídos de forma a permitir a entrada de água pelas juntas.

Os pavimentos permeáveis são superfícies drenantes que promovem a infiltração, armazenamento e percolação de parte ou da totalidade da água proveniente do escoamento superficial para dentro de uma camada de armazenamento temporário no terreno, a qual é absorvida gradualmente pelo solo (COSTA *et al.*, 2007), ou é conduzida para um sistema subsuperficial de drenagem.

A Figura 5 apresenta o esquema estrutural de um pavimento permeável típico e os principais processos de movimento de água neste sistema.



Figura 5 – Seção da estrutura típica de um pavimento permeável (adaptado de Scholz e Grabowiecki, 2007).

Segundo Ferguson (2005), um pavimento poroso é aquele que possui porosidade e permeabilidade suficiente para influenciar significativamente a hidrologia, o solo como *habitat* das raízes das plantas e outras características ambientais. Pavimentos porosos incluem asfalto e concreto porosos, blocos vazados e uma variedade de outros materiais, que podem ser utilizados na maioria das superfícies urbanas comunitárias, tais como calçadas, estacionamentos, praças, parques e áreas externas, como vias locais e de pequenos acessos.

Neste trabalho, foi utilizada a terminologia pavimentos permeáveis, como sendo a mais utilizada no Brasil e em grande parte da literatura estrangeira.

A Figura 6 apresenta dois exemplos de pavimentos permeáveis construídos com blocos de concreto do tipo intertravados, cujas juntas possibilitam a passagem da água de chuva para a estrutura do pavimento que por sua vez transmite a água para o subleito e o solo do local.



(B)

Figura 6 – Exemplos de pavimentos permeáveis com blocos de concreto intertravados. (A) Estacionamento em Faculdade de Ilinois e (B) Rua residencial em Portland, Oregon (SMITH, 2006).

Segundo Scholz e Grabowiecki (2007), os pavimentos permeáveis são comumente utilizados em: (1) acessos veiculares, (2) vias residenciais, (3) vias de serviço, (4) vias vicinais, (5) cruzamentos de vias, (6) áreas de emergência (*fire lane*), (7) vias utilitárias, (8) estabilização de declives e controle de erosão, (9) estacionamentos em geral, (10) acessos e passeios de pedestres, (11) caminhos para bicicletas, dentre outros.

Os pavimentos permeáveis são freqüentemente tratados como técnicas compensatórias de drenagem ou medidas não convencionais de controle na fonte. A seguir são apresentadas as principais vantagens e desvantagens do uso de pavimentos permeáveis (URBONAS e STAHRE, 1993⁷ apud SILVA, 2006):

⁷ URBONAS, B. e STAHRE, P. Storm water Best Management Practices and Detention. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 1993.

1) Vantagens: diminuição do risco de inundação e contribuição para a melhoria da qualidade da água no meio urbano, redução ou eliminação da rede de microdrenagem local, minimização das intervenções à jusante de novas áreas loteadas, boa integração com o espaço urbano e possibilidade de valorização da água no meio urbano, melhoria da recarga de água subterrânea, normalmente reduzida em razão da impermeabilização de superfícies, com consequente manutenção da vazão de base dos pequenos rios urbanos e baixos custos de implantação.

2) Desvantagens: necessidade de manutenção a fim de se evitar a perda de desempenho e aumentar a vida útil da estrutura, dependência de características de solo (boa capacidade de infiltração), topografia e lençol freático, falta de padrões de projeto e escassez de informações a respeito do desempenho a longo prazo, risco de contaminação do solo e aqüífero.

Também vale citar como limitações ao uso dos pavimentos permeáveis, a baixa resistência mecânica quando são severamente solicitados e a sua aceitação com relação à acessibilidade, por se tratar de superfícies geralmente rugosas, cujas juntas ou orifícios podem causar dificuldades de acessos.

A pavimentação urbana com revestimento em blocos pré-moldados de concreto de cimento Portland constitui-se em alternativa estrutural de pavimento de modelo flexível, representando uma versão moderna, e com grandes aperfeiçoamentos dos antigos calçamentos efetuados com blocos de cantaria (paralelepípedos), notando-se evolução destacada na forma, em planta, dos blocos e no seu processo de fabricação (SÃO PAULO, 2010).

Segundo as considerações da norma IP-06 da Prefeitura Municipal de São Paulo (SÃO PAULO, 2010), a adoção do revestimento com peças de concreto pré-moldadas, como as que foram utilizadas neste trabalho, deverá levar em conta, além do custo e do prazo para implantação, os seguintes aspectos: (1) propriedades características do concreto, como a resistência à compressão, abrasão e ação de agentes agressivos; (2) a utilização de mão-de-obra não especializada e de fácil obtenção no local, tendo em vista a relativa simplicidade do processo construtivo do revestimento; (3) a imediata liberação ao tráfego após a conclusão dos serviços; e (4) facilidade de remoção dos blocos e seu reaproveitamento em casos de necessidades futuras.

De acordo com Urbonas e Stahre 1993⁸ *apud* COSTA *et al.*, 2007, um pavimento permeável somente será viável para solos com taxa de infiltração superior a 7mm/h e que no período chuvoso o nível do lençol freático ou camada impermeável esteja a pelo menos 1,2m abaixo da superfície. No entanto, cabe ressaltar que o pavimento permeável também funciona

⁸ URBONAS, B. e STAHRE, P. Storm water Best Management Practices and Detention. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 1993.

como dispositivo de armazenamento temporário de água, principalmente quando é construído com sub-base granular mais espessa.

O sucesso do uso de pavimentos permeáveis depende de vários fatores que influenciam no desempenho e durabilidade do pavimento, como: (1) a capacidade de infiltração de água do revestimento superficial e do solo do subleito que possuem características distintas conforme respectivamente, o material e o terreno; (2) a condição inicial de umidade do solo e do pavimento imediatamente antes do evento de precipitação; (3) as características dos materiais utilizados nas camadas da estrutura do pavimento; (4) a espessura das camadas do pavimento; (5) as dimensões dos blocos ou placas; e por fim (6) as características do material de composição do revestimento (blocos ou placas).

A diversidade de tipos de solo e de composição dos materiais utilizados na construção do pavimento e na fabricação dos revestimentos implica em uma ampla gama de características que influenciam na eficiência do uso de pavimentos permeáveis.

Em uma revisão sobre o estado da arte de sistemas de pavimentos permeáveis, Scholz e Grabowiecki (2007) afirmam que a eficiência hidrológica e hidráulica dessas estruturas é influenciada principalmente pelo tamanho das partículas dos materiais de base e pela retenção de água na superfície do revestimento.

No Brasil pode-se citar a contribuição de Araújo, Tucci e Goldenfum (2000), onde foi avaliada a eficiência de cinco tipos de superfícies: (1) blocos de concreto - *blocket*, (2) paralelepípedos, (3) concreto convencional de cimento, (4) blocos de concreto vazados e (5) concreto poroso, construídos diretamente sobre o terreno naturalmente compactado em declividades variando entre 1 e 4%. Para obtenção do coeficiente de escoamento de cada tipo de pavimento, foram executados ensaios de simulação de chuva com intensidade de 110 mm/h e duração de 10 minutos, considerando um tempo de retorno de 5 anos. Os pavimentos de blocos vazados e o concreto poroso foram os mais eficientes, com coeficientes de escoamento de 0,03 e 0,005, respectivamente.

Acioli (2005) avaliou o desempenho hidrológico de dois tipos de pavimentos permeáveis construídos para um estacionamento de veículos em Porto Alegre – RS em uma área de 264 metros quadrados, conforme as seguintes estruturas: (1) blocos pré-moldados de concreto vazado do tipo "S" preenchidos com tufos de grama e (2) concreto asfáltico pré-misturado a frio de granulometria aberta (60% de brita 3/4", 40% de brita 3/8" e 5% do volume de agregados em emulsão asfáltica). Os revestimentos foram assentados sobre uma camada de 25 centímetros de brita graduada de 15 milímetros de diâmetro médio. Houve a aplicação de manta geotêxtil permeável sob e sobre a camada de brita. Após o monitoramento de 22 eventos naturais de chuva, foram encontrados os coeficientes de escoamento médios de

0,05 e 0,02, e máximos de 0,1350 e 0,1280, respectivamente, para o asfalto poroso e o bloco vazado com grama.

Moura (2005) utilizou parcelas de um metro quadrado para avaliar quatro tipos de superfícies: (1) grama, (2) chão batido, (3) bloco maciço e (4) bloco vazado) em duas condições de assentamento: (1) base compactada e (2) base não compactada, e diferentes condições de declividade, variando entre 2 e 7%. Para realizar os ensaios em campo, foi utilizado um simulador de chuva artificial que simulou chuvas de intensidades variadas entre 60 e 156 mm/h, e duração variando entre 30 e 60 minutos. Para obter o coeficiente de escoamento e as taxas de infiltração, foi analisado o tempo de embebição da superfície, tempo de ascensão, vazão de pico, volumes totais de precipitação e escoamento superfícial. O efeito de colmatação também foi avaliado durante os últimos ensaios. Os pavimentos construídos com bloco maciço foram os que resultaram em maiores valores de coeficiente de escoamento e, entre 0,8 e 0,93 para a maior declividade e na situação colmatada, que consequentemente todos os ensaios a equação de Horton se comportou melhor do que a equação de Philip para o ajuste dos dados obtidos.

Abbott e Comino-Mateos (2003) estudaram o desempenho e a eficiência hidráulica de um sistema de pavimento permeável para estacionamento de veículos construído com blocos de concreto poroso assentados sobre uma camada de base de cascalho com 5 centímetros de espessura, geotêxtil e uma camada de material de sub-base com 3,5 centímetros de espessura. Os autores concluíram que a colmatação da superfície do pavimento pode causar reduções significativas na taxa de infiltração causando o empoçamento superficial de água durante eventos de chuva.

Segundo Scholz e Grabowiecki (2007), os pavimentos permeáveis também funcionam como uma tecnologia para o controle de poluentes provenientes do escoamento superficial em áreas urbanas usadas como vias e estacionamento para veículos, onde a água contaminada tende a infiltrar nas camadas do pavimento. E neste caso, onde há a preocupação sobre a possível percolação de poluentes até o lençol freático, o pavimento permeável deve ser construído com uma membrana impermeável sob a estrutura do pavimento, e a água de chuva excedente deve ser direcionada a um sistema coletor de drenagem.

Brattebo e Booth (2003) investigaram o desempenho de quatro tipos de pavimentos permeáveis (1) *grasspave* (estrutura de plástico flexível preenchida com areia e plantada com grama), (2) *gravelpave* (estrutura de plástico flexível preenchida com cascalho), (3) *turfstone* (blocos de concreto pré-moldado vazados preenchidos com solo e plantada com grama) e (4) *Uni eco-stone* (blocos de concreto pré-moldado maciço), que foram avaliados

sobre a eficiência a longo prazo do controle quantitativo e qualitativo de águas pluviais na área de um estacionamento após 6 anos de uso diário. Praticamente toda a água de chuva dos eventos avaliados infiltrou através dos pavimentos permeáveis, obtendo quase nenhum escoamento superficial. E a água infiltrada pelo sistema possuía baixos níveis significativos de cobre e zinco comparados aos níveis obtidos do escoamento superficial da área asfaltada.

A vida útil e a eficiência a longo prazo dos pavimentos permeáveis em controlar a qualidade da água ainda não são bem entendidas devido à complexidade dos processos de absorção e dessorção dos poluentes pelo meio sub-superficial (WRIGHT e HEANEY, 2004).

Com relação ao custo de construção de pavimentos permeáveis, estes geralmente são aproximadamente 10% mais caros do que pavimentos equivalentes não permeáveis. Em compensação, os gastos com medidas estruturais à jusante são menores quando se utiliza pavimentos permeáveis (SORVIG, 1993⁹ *apud* WRIGHT e HEANEY, 2004).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa do trabalho consistiu em calcular as intensidades de chuva a serem simuladas artificialmente. Posteriormente, o simulador de chuva artificial foi construído e calibrado de acordo com as intensidades pré-definidas. Em seguida, foram construídos os pavimentos permeáveis delimitados em parcelas experimentais que conduzem os excessos de água para reservatórios subterrâneos, de modo a possibilitar a quantificação e o monitoramento dos escoamentos de água provenientes dos pavimentos.

4.1 Cálculo das intensidades de chuva

O cálculo das intensidades de chuva para a simulação de eventos artificiais foi realizado para reproduzir dois tipos de eventos: (1) baixa intensidade associada a longa duração e (2) alta intensidade associada a curta duração.

As intensidades de chuva foram calculadas a partir das equações do método i-d-f (intensidade, duração e freqüência) ajustadas para o município de Goiânia, Goiás (COSTA *et al.*, 2007). As Equações 6 e 7 apresentam os parâmetros e as variáveis do modelo citado.

⁹ SORVIG, K. Porous paving. Landscape Architecture, 83(2): 66-69, 1993.

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

$$i = \frac{64,3044 \times T^{0,1471}}{(t+24,8)^{0.974711}}$$
 válida para 8 anos < T ≤ 100 anos (Equação 7)

Em que:

i = intensidade máxima de chuva (mm/h);

t = duração da chuva (h);

T = período de retorno (ano).

O período de retorno utilizado em projetos de estruturas de microdrenagem é de até 5 anos e para projetos de macrodrenagem, como grandes bueiros e pontes, utilizam-se períodos de retorno entre 10 e 100 anos para a região de Goiânia, Goiás (COSTA *et al.*, 2007). O cálculo das intensidades máximas de chuva para simulação foi efetuado utilizando-se os períodos de retorno de cinco e quarenta anos, e durações de quarenta e cinco minutos e quinze minutos respectivamente, para representar as situações: (1) baixa intensidade associada a longa duração e (2) alta intensidade associada a curta duração.

A Tabela 1 apresenta o resultado do cálculo das intensidades de chuva em milímetros por hora (mm/h), de acordo com a duração do evento em minutos (min) e o período de retorno em anos.

Intensidade (mm/h)	Duração (min)	Período de retorno (anos)
69	45	5
180	15	40

Tabela 1 – Intensidades máximas de chuva calculadas de acordo com o método i-d-f ajustado para o município de Goiânia - Go.

4.2 Simulação de chuva

A simulação de chuva foi realizada com o objetivo de programar e simular eventos pré-definidos de chuva sobre as parcelas experimentais de pavimentos permeáveis.

Utilizou-se um simulador de chuva (Figura 7) desenvolvido e construído especialmente para estudos de eventos artificiais de chuva sobre superfícies em áreas urbanas (SOUSA JUNIOR, 2011). Com este simulador foi possível realizar os ensaios experimentais

sobre os pavimentos permeáveis e simular as chuvas cujas características estão apresentadas na Tabela 1.



Figura 7 - Simulador de chuva artificial. (A) Detalhe dos aspersores de água em funcionamento (adaptado de SOUSA JUNIOR, 2011).

O simulador de chuva é equipado com um registro tipo agulha de ½ polegada e um manômetro analógico conectados na tubulação d'água para controlar a vazão de entrada e aferir a pressão da água na tubulação do equipamento. E para controlar a intensidade de chuva simulada sem alterar a pressão de serviço e consequentemente o diâmetro médio das gotas, foram utilizadas duas válvulas solenóides acopladas imediatamente antes dos bicos aspersores.

A operação das válvulas é controlada por um microcomputador baseado em uma plataforma de *software* livre e projetada com um microcontrolador de placa única com suporte de entrada/saída embutido e uma linguagem de programação padrão. As válvulas solenóides são abertas quando energizadas por uma corrente elétrica de 220 volts.

Para a definição da pressão ideal de trabalho do simulador, Sousa Júnior (2011) utilizou do teste da farinha como método para a determinação do diâmetro médio das gotas de água e da velocidade terminal das gotas, que sugeriu satisfatória uma pressão de trabalho de 80 quilopascal (kPa), uma vez que nesta pressão o simulador é capaz de reproduzir chuva semelhante a eventos naturais em termos de uniformidade de distribuição da chuva, diâmetros de gotas e energia cinética (SOUSA JÚNIOR, 2011).

A calibração do simulador de chuva foi realizada utilizando-se um coletor de água do mesmo tamanho das parcelas experimentais para a pressão manométrica de 80 quilopascal

(kPa) com aberturas constante e intermitente das válvulas dos aspersores. Os resultados da calibração são apresentados na Tabela 2.

O tempo de abertura indica a duração da passagem de água através dos bicos aspersores e o tempo de fechamento indica a duração da interrupção da passagem de água, que gera intermitência ao evento de chuva artificial.

Pressão (kPa)	Intervalos válvula solenóide	Intensidades (mm/h)	Intensidade média (mm/h)	Desvio padrão	Variância	Coeficiente de variação (%)
80	Ta = constante Tf = 0	177,24 180,50 182,03	179,92	2,45	5,98	1,39
80	Ta = 1,17 segundo Tf = 3 segundos	67,77 68,89 71,20	69,28	1,74	3,06	2,52

Tabela 2 – Intensidades médias para as duas condições de calibração do simulador de chuvas artificiais.

Ta = tempo de abertura das válvulas; Tf = tempo de fechamento das válvulas.

Apesar do pequeno número de amostras (3 medições), os baixos valores do coeficiente de variação (1,39 e 2,52%) sugerem que a calibração é confiável e as intensidades condizem com a realidade.

O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) do evento de chuva artificial para a pressão de trabalho de 80 kPa foi determinado utilizando-se copos descartáveis distribuídos equidistantes sobre uma das parcelas experimentais, cujos volumes captados foram quantificados e encontrado o CUC médio de 68,3% (SOUSA JÚNIOR, 2011).

4.3 Monitoramento da umidade dos pavimentos

A umidade das camadas estruturais dos pavimentos permeáveis foi medida durante os ensaios experimentais com o uso de quatro sensores de umidade digitais instalados em pontos equidistantes na parcela experimental e em diferentes profundidades, com o propósito de monitorar a evolução da umidade nessas camadas e relacionar com os resultados dos ensaios experimentais.

Esse monitoramento foi efetuado devido à importância das condições iniciais de umidade do solo e da estrutura do pavimento com relação ao desempenho do pavimento no controle do escoamento superficial.

Nos trabalhos realizados por Silva (2006) e Moura (2005), estes sugerem utilizar metodologias para o controle da umidade nas camadas subjacentes aos revestimentos e automatizar o processo de quantificação do escoamento superficial durante as simulações de chuva, que também foi realizado.
A localização dos sensores e as etapas de instalação dos sensores de umidade nas parcelas experimentais são apresentadas na Figura 8. Primeiramente retirava-se as peças do revestimento do local, perfurava-se a(s) camada(s) do pavimento em quatro pontos e nas profundidades das respectivas camadas (4 ou 7cm), de forma que cada camada ficou com dois sensores equidistantes. Introduzia-se um sensor em cada orifício e preenchia-se com o mesmo material retirado com a perfuração. Por fim, recolocava-se as peças dos revestimentos e conectava-se os sensores ao *datalogger*, que registrava o conteúdo de água no solo ou camadas do pavimento (m³/m³) desde o início dos ensaios experimentais por pelo menos doze horas, em intervalos de cinco segundos.



Figura 8 – Instalação dos sensores de umidade nas parcelas experimentais. (A) Placas de concreto poroso, (B) Blocos de concreto maciço tipo "paver" e (C) Blocos de concreto vazado tipo "concregrama".

4.4 Medição dos escoamentos

O propósito da medição do escoamento superficial e subsuperficial das parcelas experimentais foi quantificar e monitorar o volume de água escoado dos pavimentos permeáveis ao longo do tempo.

Para a medição do escoamento media-se o nível d'água acumulado nos reservatórios (tubos de 200 milímetros de diâmetro) tampados no fundo, utilizando-se de

sensores barométricos de nível d'água. Estes sensores são equipamentos eletrônicos submersíveis programados para registrar leituras em intervalos de tempo pré-definidos em programa computacional fornecido pelo fabricante. A precisão de leitura do equipamento é de 0,0001 metro e a acurácia das leituras para a profundidade utilizada é de no máximo 0,2%.

Para atestar o funcionamento dos sensores, foi utilizado o mesmo reservatório (tubo de 200 mm de diâmetro tampado no fundo) utilizado nas parcelas experimentais e instalada uma mangueira transparente conectada ao fundo (*cap*) do tubo e fixada junto a uma fita métrica ao longo do tubo, para permitir a observação do nível d'água no tubo.

Os resultados de calibração são apresentados na Figura 9 e relacionam a leitura registrada pelo equipamento em milibar com o nível d'água em centímetros no reservatório. Os resultados demonstraram que o equipamento garante um comportamento linear com bons valores para o coeficiente de determinação entre os dados registrados (padrão) pelo equipamento (mbar) e os dados observados do nível d'água (cm) no reservatório.



Figura 9 – Resultados de calibração dos sensores barométricos de nível d'água.

A vazão dos escoamentos superficial e subsuperficial foram calculadas a partir da derivação dos dados de registro acumulado dos sensores barométricos de nível d'água.

A taxa de infiltração foi calculada a partir da diferença entre a intensidade da chuva e a vazão do escoamento superficial.

O coeficiente de escoamento superficial foi calculado a partir da razão entre o volume total de água escoada pela superfície do pavimento e o volume total de água de chuva simulada (Equação 3, página 22).

Os parâmetros dos modelos de Horton e Green-Ampt foram obtidos por meio do ajuste dos dados calculados da taxa de infiltração com o auxílio de programas computacionais para cada um dos ensaios experimentais.

4.5 Caracterização do solo, materiais e pavimentos

A caracterização do solo local, dos materiais de construção e dos pavimentos foi realizada com o propósito de identificar e reconhecer suas propriedades físicas com relação às interferências na capacidade de infiltração e resistência dos pavimentos.

As propriedades físicas do solo estudado foram: (1) granulometria, (2) porosidade, (3) permeabilidade e (4) teor de umidade. Os parâmetros geotécnicos estudados nos pavimentos foram: (1) capacidade de suporte a partir do método CBR - *California Bearing Ratio*, (2) de campo "Prova de carga estática", e (3) índice de penetração "DN" a partir do método DCP - *Dynamic Cone Penetrometer*.

Todos os ensaios foram executados apenas uma vez para cada tipo de amostra ou local de acordo com os padrões das respectivas normas técnicas. A Tabela 3 apresenta os ensaios e testes realizados neste estudo, e as respectivas normas.

Tabela 3 – Ensaios e normas de referência para as amostras de solo, areia e brita.

ENSAIO	NORMA	Amostras	
Análise granulométrica	NBR-7181 (ABNT, 1984d)	Solo, areia e brita	
Massa específica dos grãos de solos	NBR-6508 (ABNT, 1984b)	Solo, areia e brita	
Limites de consistência: liquidez e	NBR-6459 (ABNT, 1984a)	C al a	
plasticidade	e NBR-7180 (ABNT, 1984c)	tc) Solo	
Compactação	NBR-7182 (ABNT, 1986a)	Solo	
California Bearing Ratio (CBR)	NBR-9895 (ABNT, 1987c)	Solo	
Permeabilidade à carga variável	NBR-14545 (ABNT, 2000)	Solo	
Massa específica aparente in situ (frasco	NBR-7185 (ABNT, 1986b)	Solo (campo)	
de areia)			
Dynamic Cone Penetrometer (DCP)	D-6951 (ASTM, 2003)	Solo (campo)	
Determinação do índice de vazios mínimo	NBR-12051 (ABNT, 1991)	Areia e brita	
de solos não-coesivos.			
Prova de carga estática	Norma 055-ME (DNIT, 2004)	Pavimento (campo)	

O ensaio de compactação em laboratório da amostra de solo foi realizado na energia Próctor normal de acordo com os procedimentos da norma NBR-7182 (ABNT, 1968a).

O coeficiente de permeabilidade foi determinado para a amostra do solo *in situ* do subleito e para a amostra moldada do solo compactado na energia Próctor normal. Os gradientes hidráulicos utilizados na execução dos ensaios foram 3 e 10, respectivamente para a amostra do solo na condição natural e para a amostra moldada do solo.

O grau de saturação (Equação 8) das camadas dos pavimentos foi calculado com o intuito de reconhecer a condição de saturação média no pavimento do início até o final dos ensaios experimentais de simulação de chuva, a partir dos dados obtidos em laboratório e os dados de umidade registrados pelos sensores durante os ensaios.

$$S_R = \frac{W. \gamma_G}{e. \gamma_a}$$
(Equação 8)

Em que,

 S_R = grau de saturação relativo (%)

w = umidade(%)

 γ_G = peso específico dos grãos (kN/m³)

 $\gamma a =$ peso específico da água (kN/m³)

O grau de saturação médio das camadas do pavimento foi obtido a partir da média dos graus de saturação calculados para cada um dos quatro sensores de umidade instalados na parcela experimental.

O peso específico aparente, *in situ*, do solo e a umidade de campo foram determinados em amostragens realizadas no ponto central do subleito de cada parcela experimental.

O método DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*), ilustrado na Figura 10, foi executado em três pontos centrais equidistantes de cada trecho experimental e obtido a média dos resultados.

O índice de penetração (DN), em milímetros por golpe, foi determinado a partir da relação entre a profundidade e o número de golpes necessários para atingir a profundidade. O DN indica a resistência da camada aos golpes do penetrômetro, em que valores menores implicam em maior resistência do material.



Figura 10 – Equipamento do método DCP utilizado na camada de subleito das parcelas experimentais. (A) Detalhe do peso e régua graduada.

A Prova de carga estática, ilustrada na Figura 11, foi executada de acordo com a Norma 055 – ME (DNIT, 2004) em cada um dos tipos de revestimento assentados sobre o trecho experimental construído exclusivamente para esses ensaios, que é uma réplica do Trecho I, onde não houve a compactação mecânica do solo do subleito e os revestimentos foram assentados sobre o terreno natural nivelado e uma camada de areia de quatro centímetros de espessura.











Figura 11 – Prova de carga estática durante execução. (A) Caminhão carregado com 8200 kg. (B) Detalhe do cilindro de elevação hidráulica. (C) Detalhe dos sensores de deslocamento.

4.6 Dimensionamento e construção dos pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis foram construídos nos meses de junho e julho do ano de 2010 nas dependências da Escola de Engenharia Civil - EEC da Universidade Federal de Goiás - UFG, no município de Goiânia, Estado de Goiás.

A seleção dos revestimentos foi feita com base na oferta dos fabricantes e fornecedores da região de Goiânia. Foram selecionados três tipos de revestimento de uso potencial em estacionamentos e calçamentos de áreas urbanas (Quadro 1), sendo os dois primeiros tipos (A e B), mais frequentemente utilizados em calçadas e estacionamentos e o terceiro tipo (C) trata-se de placas de concreto poroso utilizado em áreas de calçadas e passeios. Este último não é recomendado para uso em estacionamentos ou locais de passagem de veículos devido à resistência mecânica limitada, de acordo com as especificações do fabricante.

Revestimento	Dimensões*	Usos comuns	Ilustração
	(cm)	recomendados	
Bloco pré-moldado maciço do tipo "paver"	20-10-4	Calçadas, estacionamentos e áreas externas.	(A)
Bloco pré-moldado vazado do tipo "concregrama"	50-50-10	Calçadas, estacionamentos e áreas externas.	(B)
Placa de concreto poroso	40-40-6	Calçadas e áreas externas.	

Quadro 1 - Principais características dos revestimentos a serem utilizados no experimento.

* Dimensões em centímetros respectivamente comprimento, largura e espessura.

Outra consideração com relação à escolha dos revestimentos foi o atendimento às normas NBR 9780 (ABNT, 1987a) e NBR 9781 (ABNT, 1987b) por parte dos fabricantes. Essas normas fixam as condições exigíveis para a aceitação de peças pré-moldadas de concreto, destinadas à pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamento ou similares, com relação à resistência à compressão e qualidade das peças.

A construção dos pavimentos foi executada com o propósito de avaliar três condições estruturais para os três tipos de revestimento escolhidos, que totalizou em nove condições experimentais distintas, em nove parcelas experimentais.

A estrutura dos pavimentos foi construída em três trechos (I, II, III) com dimensões de 6,0 metros de comprimento e 1,6 metros de largura, e posteriormente subdivididos em parcelas de 2 metros por 1,6 metros (3,2 metros quadrados). Os trechos experimentais compreendem três condições diferentes de pavimentação, conforme apresentado na Tabela 4 e na Figura 12, que apresenta o perfil esquemático das seções dos pavimentos permeáveis e suas respectivas espessuras.

TRECHO	Ι	II	III
Camada			
Revestimento	Blocos	Blocos	Blocos
Base (areia)	4 cm	7 cm	7 cm
Geotêxtil	-	Sim	Sim
Sub-base (brita tipo1)	-	-	7 cm
Geotêxtil	-	-	Sim
Subleito	Natural	Compactado	Compactado

Tabela 4 – Trechos e respectivas condições de construção dos pavimentos.

O propósito do Trecho I foi de reproduzir condições frequentemente utilizadas no meio prático de construção desses tipos de pavimentos, onde efetuou-se a limpeza superficial do terreno a ser construído, fez-se o nivelamento, aplicou-se uma camada de 5 centímetros de espessura de areia média, que ao ser compactada manualmente passou a possuir espessura média de 4 centímetros. Por fim, assentou-se as peças de concreto pré-moldado firmemente pressionadas e aplicou-se uma fina camada de areia sobre os blocos para o preenchimento das juntas e volumes vazios na superfície.

O Trecho II foi construído com o propósito de reproduzir condições intermediárias, entre a estrutura esbelta do Trecho I e a estrutura mais reforçada do Trecho III.

E a estrutura do Trecho III foi definida com base em recomendações da literatura e sugestões de fabricantes de revestimentos permeáveis, com o propósito de resistir a usos mais severos como para estacionamentos, acessos e locais de passagem de veículos. A espessura da camada granular deste Trecho, que funciona como reservatório temporário de água de chuva e como reforço geotécnico ao pavimento, foi calculada com base na seguinte equação:

$$H = \frac{V_{\text{max}}}{n}$$
 (Equação 9)

Em que:

H = altura da camada de reservatório

 V_{max} = volume de armazenamento máximo

n =porosidade do material

O maior volume de água simulado (51,75 mm) foi obtido com base na intensidade de 69 mm/h e duração de 45 minutos, calculada pelo método i-d-f com o tempo de retorno de 5 anos, conforme descrito no item 4.1.

No Trecho III optou-se por utilizar duas camadas, uma de sub-base de brita tipo 1 e outra de base de areia média. Dessa forma, dividiu-se o volume máximo de água a ser armazenado na estrutura do pavimento em duas partes iguais, $V_{max} = 25,87$ mm para cada uma das camadas do pavimento: base e sub-base.

Sendo assim, para a camada de brita tipo 1, porosidade medida igual a 0,49, e substituindo-se os valores na equação 10, obteve-se:

$$H = \frac{25,87}{0,49} = 52,8mm$$

Para a camada de areia, porosidade medida igual a 0,47, obteve-se o seguinte resultado:

$$H = \frac{25,87}{0,47} = 55,05mm$$

Como o Trecho III foi dimensionado pensando em solicitações mais severas como o trânsito leve de veículos, e considerando a declividade média de 1,5% optou-se por ajustar a espessura em 70 mm para cada uma das camadas de base e sub-base do pavimento.



Figura 12 – Perfil esquemático das seções nas três condições experimentais.

A compactação do terreno de fundação (subleito) foi controlada pelo método do frasco de areia (ABNT, 1986c) com o objetivo de reproduzir duas diferentes situações normalmente encontradas na prática: (1) subleito natural (2) subleito compactado mecanicamente. Para o segundo caso, a compactação foi executada com o uso de um compactador à gasolina de operação manual, que também foi utilizado na compactação das demais camadas de base (areia) e sub-base (brita tipo 1) dos Trechos II e III.

Para possibilitar a quantificação do escoamento subsuperficial, foram instalados tubos de PEAD (polietileno de alta densidade) perfurados de diâmetro de 65 mm envolvidos por manta geotêxtil assentados nas cotas mais baixas do terreno com saída no fundo das parcelas dos Trechos II e III, que possuem camada(s) de base granular.

A Figura 13 ilustra as etapas de construção das parcelas experimentais nas condições apresentadas na Tabela 7. Primeiramente foi realizada a escavação do terreno na profundidade das camadas do pavimento a ser construído (A). Depois foi feito a compactação do solo do subleito (Trechos II e III) com o compactador mecânico (B) e aplicado o geotêxtil sobre essa camada. Nos Trechos II e III instalou-se os tubos de drenagem subsuperficial (F) envolvidos com o geotêxtil e aplicada a camada de brita tipo 1 como sub-base no Trecho III (C) e a camada de areia como base no Trecho II (D), que foram compactadas com o compactador mecânico. Sobre a camada de sub-base do Trecho III aplicou-se o geotêxtil para receber a camada de base de areia. Para o assentamento dos revestimentos no Trecho I, foi aplicado somente uma fina camada de areia de 4 centímetros de espessura. A próxima etapa foi a delimitação das parcelas com as chapas de zinco (E). Por fim, as peças dos revestimentos foram instaladas sobre a camada de assentamento previamente nivelada. Para a instalação dos tubos reservatórios de PVC para a medição do escoamento, foi feita a perfuração do solo no lado de fora da parcela, próximo à saída dos escoamentos (H) e posteriormente conectados os tubos coletores de água das parcelas.



(A) Escavação dos trechos



(B) Compactação do solo (Trechos II e III)



(C) Aplicação do geotêxtil e brita tipo 1



(D) Aplicação do geotêxtil e areia



(E) Delimitação das parcelas experimentais em 2m x 1,5m



(F) Instalação dos tubos drenantes no fundo das parcelas (Trechos II e III)



(G) Nivelamento e aplicação dos revestimentos



(H) Escavação e colocação dos tubos reservatórios



(I) Parcelas prontas e simulador de chuva

Figura 13 – Etapas de construção dos pavimentos permeáveis em parcelas experimentais.

O nivelamento dos trechos foi controlado procurando-se atingir uma declividade média de 1,5 por cento diagonalmente no sentido do(s) reservatório(s). Este valor foi escolhido com base no Código de Obras do Município de Goiânia (GOIÂNIA, 2008), que regulamenta a construção e manutenção de passeios públicos ou calçadas, conforme o artigo 55, inciso III, que exige uma declividade máxima de 3% (três por cento) do alinhamento para o meio-fio.

A Figura 14 apresenta a imagem do Trecho I logo após a sua construção, com os três tipos de revestimentos utilizados. Os espaços vazios do bloco pré-moldado vazado (concregrama) foram preenchidos com o solo do próprio local e feito o replantio da grama do tipo batatais (*Paspalum notatum*).



Figura 14 – Revestimentos utilizados na construção das parcelas experimentais em pavimentos permeáveis. (A) bloco de concreto pré-moldado vazado do tipo "concregrama"; (B) placa de concreto poroso e (C) bloco de concreto pré-moldado maciço do tipo "paver".

Para a delimitação das parcelas foram utilizadas lâminas de zinco cravadas em uma profundidade média de dez centímetros no solo de fundação do terreno. A água de chuva escoa para um dos cantos da parcela, onde foi feita uma abertura conectada a um tubo que conduz a água do escoamento superficial para o reservatório subterrâneo (Figura 15).



Figura 15 – Desenho esquemático do quadro metálico de delimitação da parcela amostral e dos reservatórios subterrâneos (Sofia Leão, 2011).

4.7 Análise estatística

O propósito da análise estatística dos resultados deste trabalho foi comparar os dados obtidos dos ensaios experimentais entre os diferentes tipos de revestimento e as diferentes condições estruturais dos pavimentos permeáveis utilizados neste trabalho.

Para a comparação dos resultados entre os grupos de dados utilizou-se da Análise de Variância (ANOVA) quando os dados possuíam distribuição normal. Nos casos de existência de significância estatística, para comparar os resultados entre si utilizou-se o teste de Tukey.

Nos casos em que os dados cuja distribuição não possuía normalidade utilizou-se para a análise estatística o teste não paramétrico de Kruskal Wallis.

Após a organização dos dados, foi utilizado o programa computacional SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) versão 15.0 que gerou os resultados de acordo com o nível de significância de 5%.

Os dados comparados foram:

- Coeficiente de escoamento, volume total de escoamento superficial e volume total de infiltração *versus* tipos de revestimento;
- Coeficiente de escoamento, volume total de escoamento superficial, volume total de infiltração, volume total de escoamento subsuperficial e volume total de armazenamento *versus* condições estruturais de pavimentação;
- Tempo de embebição, tempo de pico, tempo final de escoamento superficial e vazão de pico *versus* tipo de revestimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados da caracterização do solo, dos materiais de construção e dos pavimentos permeáveis (Item 5.1).

Os resultados dos ensaios experimentais são apresentados no Item 5.2 na seguinte ordem: (1) Trecho-I, (2) Trecho-II e (3) Trecho-III, cada um nos três tipos de revestimento: (1) PAV - Bloco de concreto maciço tipo "*paver*", (2) PCP – Placa de concreto poroso e (3) CCG – Bloco de concreto vazado tipo "concregrama".

Os resultados da análise estatística dos dados são apresentados no Item 5.3. E os resultados da resistência à prova de carga estática são apresentados no Item 5.4.

5.1 Caracterização do solo, materiais e pavimentos

Neste item são apresentados os resultados da caracacterização do solo do subleito dos pavimentos permeáveis, dos materiais de construção e dos trechos experimentais.

O solo do subleito apresentou as porcentagens das frações de argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa e pedregulho, conforme consta na Tabela 5, de acordo com a classificação da norma NBR-6502 (ABNT, 1995).

FRAÇÃO	FAIXA (mm) -	SOLO COM DEFLOCULANTE	SOLO SEM DEFLOCULANTE
		Porcentagem (%)	Porcentagem (%)
ARGILA	< 0,002	14,54	0,00
SILTE	0,002 - 0,06	19,05	17,28
AREIA FINA	0,06 - 0,20	28,34	44,65
AREIA MÉDIA	0,20 - 0,60	24,09	24,09
AREIA GROSSA	0,60 - 2,0	6,34	6,34
PEDREGULHO	2,0 - 60	7,64	7,64
TOTA	L	100,00	100,00

Tabela 5 – Frações de argila, silte, areias e pedregulho contidas na amostra de solo, com e sem o uso de defloculante.

A Figura 16 apresenta o gráfico da análise granulométrica da amostra do solo do subleito, por meio do ensaio de peneiramento e sedimentação com e sem o uso do defloculante hexametafosfato de sódio.





Observa-se que ao usar o defloculante, as agregações existentes no solo são desfeitas, pois se verifica a redução do teor de areia fina e aumento dos teores de silte e argila.

Esse comportamento é típico de solos tropicais intemperizados. A predominância de areia fina no solo em seu estado natural e a alta porcentagem de areia média caracterizam boa drenagem ao solo.

Os resultados dos limites de consistência e a massa específica dos grãos da amostra do solo do subleito são apresentados na Tabela 6. A baixa plasticidade do solo evidenciada pelo valor encontrado para o limite de liquidez (34%) sugere que o solo possui características de drenagem ruins e baixa permeabilidade quando compactado.

Amostra	Propriedades			
	ρ (kN/m³)	wL (%)	wP (%)	IP (%)
Solo	27,28	34	21	13

Tabela 6 - Massa específica dos grãos e limites de consistência do solo do subleito.

Onde: ρ = massa específica dos grãos; wL = limite de liquidez; wP = limite de plasticidade; IP = índice de plasticidade.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos solos (SUCS), o solo em estudo pertence ao grupo SM, solos arenosos com quantidades apreciáveis de finos, que possui propriedades satisfatórias de resistência, baixa compressibilidade, característica de drenagem regular a má e permeabilidade deficiente, quando compactado.

Segundo o sistema Transportation Research Board (TRB), o solo em estudo pertence ao grupo A-6, solos silto-argilosos medianamente plásticos com pouco ou nenhum material grosso.

O ensaio de compactação em laboratório da amostra de solo foi realizado na energia Próctor normal. A massa específica aparente seca máxima encontrada foi de 15,80 kN/m^3 na umidade ótima de 22%, apresentado graficamente na Figura 17.



Figura 17- Gráfico resultado do ensaio de compactação para a amostra de solo.

O CBR (*California Bearing Ratio*) e a expansibilidade para o solo na umidade ótima de 22% foram respectivamente 10% e 0,08%, determinados a partir das curvas resultantes do método (Figura 18). Esses valores são comumente encontrados para solos da região de Goiânia – Go, que reflete num material de baixa capacidade de suporte e baixa expansibilidade.



Figura 18 - Gráficos de determinação do CBR - California Bearing Ratio (A) e Expansibilidade (B).

Os coeficientes de permeabilidade obtidos em condições de laboratório para a amostra do solo do subleito natural (amostra indeformada) e para a amostra moldada do solo compactado foram respectivamente 6,86 x 10^{-5} e 3,83 x 10^{-7} cm/s. Os valores encontrados evidenciam a grande diferença entre a permeabilidade do solo em condições naturais e após ser compactado.

Coeficientes de permeabilidade da ordem de 10^{-5} e 10^{-6} cm/s são normalmente encontrados em materiais siltosos e areias argilosas. E solos compactados em umidades entre 19 e 21% possuem coeficientes de permeabilidade da ordem de 10^{-7} cm/s (PINTO, 2002).

A partir dos coeficientes de permeabilidade encontrados em laboratório e utilizando-se a equação representativa da lei de Darcy: $Q = K \times H/L \times A$ (PINTO, 2002); em que Q é a vazão, H é a altura da coluna d'água, L é o comprimento do percurso de infiltração de água e A é a área da seção a ser percorrida, pode-se obter estimativas da vazão de infiltração de água no solo de fundação dos pavimentos.

Para as parcelas cujo solo do subleito não foi compactado mecanicamente e supondo um gradiente hidráulico (H/L) de 10^{-1} obteve-se a estimativa de vazão de infiltração de água da ordem de 0,79 L/h. Para as parcelas cujo solo do subleito foi compactado mecanicamente e supondo um gradiente hidráulico (H/L) de 1,5 x 10^{-1} obteve-se a estimativa de vazão de infiltração de água da ordem de 0,0066 L/h. Neste último caso, pode-se inferir que durante os ensaios de simulação de chuva realizados neste estudo, não haverá perda de água significativa através do solo de subleito.

Nas parcelas onde não houve compactação mecânica do subleito (Trecho I), obteve-se o valor médio de 14,95 kN/m³ para o peso específico aparente. Valor próximo da densidade aparente máxima seca obtida em laboratório (15,80 kN/m³), que indica alto grau de compactação para um terreno natural que não foi compactado mecanicamente.

Para as parcelas onde houve a compactação mecânica do subleito, foram obtidas as médias de 16,53 e 16,00 kN/m³ respectivamente para os Trechos II e III, valores que correspondem respectivamente ao grau de compactação de 104,6 e 101,2% em relação à densidade aparente máxima seca obtida em laboratório (15,80 kN/m³).

A massa específica obtida dos grãos da areia utilizada nas camadas de base dos pavimentos foi de 27,09 kN/m³, valores normalmente encontrados para areias médias. E a massa específica obtida da amostra das pedras de brita foi de 26,55 kN/m³.

Os índices de vazios (e), relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos, da areia e da brita resultou nos respectivos valores: 0,89 e 0,97. E as porosidades, relação entre o volume de vazios e o volume total de uma amostra (n = e / (1+e)) obtidas para a areia e a brita foram respectivamente: 0,47 e 0,49.

Dessa forma, foi possível estimar a capacidade média de armazenamento de água nas camadas de base e sub-base dos pavimentos. Na primeira condição (Trecho I), onde existe somente uma camada de areia de 4 centímetros de espessura, estima-se uma capacidade média de 60 litros de armazenamento de água em cada parcela experimental de 3,2 metros quadrados. Na segunda condição (Trecho II), onde existe uma camada de areia de 7 centímetros de espessura, estima-se uma capacidade média de 105 litros de armazenamento de água para cada parcela experimental. E na terceira condição (Trecho III), onde existe uma camada de areia de 7 centímetros de espessura, estima-se uma capacidade média de 105 litros de armazenamento de água para cada parcela experimental. E na terceira condição (Trecho III), onde existe uma camada de areia de 7 centímetros de espessura e uma camada de brita de 7 centímetros de espessura, estima-se uma média de 214 litros de armazenamento de água em cada parcela experimental.

O Apêndice B apresenta os registros do método DCP (*Dynamic Cone Penetrometer*) em gráficos que relacionam o número de golpes com a profundidade em centímetros e em tabelas contendo os registros das profundidades, espessuras e o índice profundidade/golpe (DN).

Os diagramas estruturais que relacionam o índice de penetração (DN) em milímetros por golpe (mm/golpe) com a profundidade em centímetros (cm) são apresentados na Figuras 19 e 20, respectivamente, para o subleito do pavimento e para o pavimento completo, excetuando-se o revestimento.



Figura 19 - Diagramas estruturais (método DCP) do subleito dos Trechos I, II e III.

Os valores encontrados para o DN variaram de 4 a 48 mm/golpe dependendo do tipo e condição do material de cada camada dos pavimentos analisados. Ao longo das profundidades dos pavimentos foi possível observar e caracterizar as diferentes camadas e comportamentos.

Nas parcelas do Trecho I, como o subleito não foi compactado, os resultados do método DCP se apresentaram de forma heterogênea com grandes variações entre as camadas e os pontos ensaiados. Inicialmente observa-se uma camada superficial com menos de 10 centímetros de espessura e DN variando entre 12 e 23 mm/golpe. Abaixo dessa camada, verifica-se a existência de um material mais resistente (DN de 8 a 21 mm/golpe), mas com espessura de camada variável.



Figura 20 - Diagramas estruturais (método DCP) dos pavimentos nos Trechos II e III.

Os Trechos II e III apresentaram comportamentos mais homogêneos em função da compactação do subleito que gerou uma melhoria na resistência da primeira camada do subleito (DN < 10 mm/golpe) e homogeneização da fundação do pavimento.

No Trecho II a camada de base de areia, apresentou comportamento heterogêneo com relação ao índice DN, que variou entre 4 a 44 mm/golpe. Os baixos valores encontrados podem estar relacionados a algum tipo de erro durante a execução dos ensaios de DCP, cuja haste pode ter atravessado a camada de areia antes do início da contagem dos golpes.

No Trecho III observou-se valores iniciais de DN acima de 37 mm/golpe que atingiu uma espessura média de 4 centímetros. A camada imediatamente abaixo, separada por geotêxtil e composta por pedras britadas, apresentou valores de DN próximos de 11 mm/golpe e espessura variável entre 5 e 16 centímetros, que pode ter sido influenciada pela presença da manta geotêxtil. As demais camadas do subleito apresentaram variação elevada entre os índices DN calculados e também entre as espessuras das camadas.

Em síntese o Trecho III foi a estrutura de pavimento que apresentou melhores resultados com relação ao desempenho geotécnico, que pode ser atribuído pela estrutura mais robusta e pela composição de brita, que possui maior resistência mecânica.

5.2 Ensaios com os pavimentos permeáveis

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios experimentais na seguinte ordem: (5.2.1) Parcelas nas condições do Trecho-I, (5.2.2) Parcelas nas condições do Trecho-II e (5.2.3) Parcelas nas condições do Trecho-III.

No Apêndice A são apresentadas as tabelas com os resultados dos ensaios experimentais de simulação de chuva sobre os pavimentos permeáveis contendo os registros de data, hora, tempo (t) em minutos, e os parâmetros calculados: volume de precipitação acumulado (Vprec) em litros, volume de escoamento superficial acumulado (V esc) em litros, volume de infiltração acumulado (V inf) em litros, volume de escoamento subsuperficial acumulado (V base) em litros, volume de armazenamento acumulado no pavimento (V arm) em litros, vazão de escoamento superficial (Q esc) em milímetros por hora, vazão de infiltração no pavimento (Q inf) em milímetros por hora e vazão de escoamento subsuperficial (Q base) em milímetros por hora.

Os resultados finais dos volumes acumulados, coeficiente de escoamento superficial, os parâmetros de ajuste aos modelos de Horton e de Green-Ampt, a vazão de pico e as fases (tempo de embebição, tempo de pico e tempo final do escoamento superficial) dos ensaios realizados nas parcelas experimentais são apresentados ao final desta seção.

A seguir são apresentados os resultados de escoamento superficial, escoamento subsuperficial e a infiltração nas parcelas experimentais para os ensaios de simulação de chuvas artificiais, assim como o gráfico do ajuste dos dados de infiltração ao modelo de Horton e o gráfico de evolução da saturação da(s) camada(s) do pavimento ao longo da duração do ensaio experimental.

A discussão dos resultados foi feita em conjunto com o propósito de comparar o comportamento dos hidrogramas e taxas de infiltração entre as diferentes condições de pavimentação e simulação de chuva.

5.2.1 Parcelas nas condições do TRECHO-I

Os ensaios experimentais sobre os PAV-I, PCP-I e CCG-I foram realizados inicialmente com a simulação de chuva de intensidade de 180 mm/h durante 15 minutos. A Figura 21 apresenta os gráficos dos resultados dos escoamentos superficiais e infiltração em milímetros por hora ao longo do tempo, e os gráficos dos ajustes às equações de Horton e Green-Ampt são apresentados na Figura 22.

Os hidrogramas de escoamento superficial mostram diferenças visíveis entre os tipos de revestimento PAV, PCP e CCG. Nessas condições, o CCG foi o tipo de revestimento que apresentou a menor vazão de pico (41,73 mm/h). No entanto esta vazão de pico perdurou cerca de 7 minutos (regime permanente), o que não ocorreu nos demais tipos de revestimento.

Comparando-se os revestimentos PAV e PCP que apresentaram vazão de pico semelhante, 91,8 e 94,04 mm/h respectivamente, o PCP mostrou melhores resultados com relação ao retardo nos tempos de pico e de embebição (Tabela 10, página 79).



PAV-I

Figura 21 - Escoamento superficial e infiltração nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos.



Figura 22 – Ajustes dos dados de infiltração nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos.

Os ajustes dos dados experimentais da taxa de infiltração aos modelos de Horton e Green-Ampt (Fig. 22) para as parcelas PAV-I, PCP-I e CCG-I apresentaram-se satisfatórios em termos de coeficiente de determinação ($R^2 > 0.85$). Para a parcela PCP-I, o ajuste ao modelo de Horton foi pouco representativo para a fase final de decaimento da infiltração, em função da menor quantidade de pontos experimentais disponíveis. Com relação aos parâmetros de Green-Ampt obtidos para o PCP-I, os valores apresentaram-se fora do esperado e indica um ajuste não satisfatório devido ao comportamento atípico no início do registro da infiltração, onde houve um decréscimo muito forte da taxa de infiltração.

A saturação relativa média do solo durante os ensaios (Figura 23) mostra que a parcela PCP-I registrou uma condição inicial menos saturada (26%) em relação às demais parcelas.







Figura 23 – Evolução da saturação do solo nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos.

A saturação relativa do solo em PAV-I apresentou comportamento diferenciado em comparação às demais parcelas PCP-I e CCG-I, onde houve a perduração do pico em cerca de 30 minutos. O pico da saturação relativa do solo em PAV-I não durou mais do que 3 minutos. Esse comportamento pode ser atribuído às diferentes características do PAV, que possui permeabilidade limitada às juntas das peças.

A Figura 24 apresentam os gráficos dos resultados dos ensaios para a simulação de chuva de intensidade 69 mm/h durante 45 minutos nas mesmas parcelas PAV-I, PCP-I e CCG-I.

Dentre os tipos de revestimentos avaliados nessas condições, o PCP também foi o que apresentou o menor coeficiente de escoamento (0,07), ou seja, o melhor desempenho hidrológico. Por outro lado, o revestimento PAV foi o que apresentou o maior coeficiente de escoamento (0,21) (Tabela 7, página 72).

Com relação ao ajuste dos dados experimentais de infiltração ao modelo de Horton (Figura 25), obteve-se parâmetros diferenciados em PCP-I, maior capacidade de infiltração final (Io = 48,64 mm/h) e menor valor para a constante de decaimento (K = 10,48), o que mostra um comportamento mais favorável com relação ao controle na produção de escoamento superficial. Os parâmetros de Green-Ampt para essas condições (PCP-I) foram: Ko = 21,14 mm/h e Ψ . $\Delta\theta$ = 72,07 mm.

Nessas condições, o PCP foi o tipo de revestimento que apresentou a menor vazão de pico (18,81 mm/h) e o maior tempo de embebição (30,4 min), que é uma condição favorável à redução da vazão de pico e ao armazenamento temporário de grande parte da água precipitada.











Figura 24 - Escoamento superficial e infiltração nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos.







CCG-I



Figura 25 - Ajustes dos dados de infiltração nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos.

Os gráficos da saturação relativa média do solo (Figura 26) nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de chuva de intensidade 69 mm/h durante 45 minutos mostram que a condição inicial de umidade nos pavimentos variou entre 20 e 30%. Os valores iniciais de umidade (30%) registrados em PAV-I foram os maiores em relação às demais parcelas PCP-I e CCG-I, o que pode explicar o maior coeficiente de escoamento em PAV-I.



CCG-I



Figura 26 – Evolução da saturação do solo nos PAV-I, PCP-I e CCG-I para a simulação de chuva de 69mm/h durante 45 minutos.

Os gráficos também mostram que ocorreu a permanência do pico de saturação nas camadas dos pavimentos em cerca de 30 minutos, em virtude da maior duração (45 min) da simulação de chuva.

5.2.2 Parcelas nas condições do TRECHO-II

A Figura 27 apresenta os resultados da simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos nas parcelas PAV-II, PCP-II e CCG-II.

Na parcela PAV-II foi observado o maior volume de escoamento superficial (120,11 L) e consequentemente o maior coeficiente de escoamento (0,89), que pode ser parcialmente explicado pelo acúmulo de impurezas e sedimentos (colmatação) na superfície do pavimento. Esse resultado também pode estar relacionado à delimitação desta parcela, que eventualmente ficou com uma área um pouco menor (3 m²) do que as demais.

Na parcela CCG-II ocorrera o escoamento superficial mínimo de 0,058 litro aos 16 minutos de ensaio e não foi possível calcular a taxa de infiltração no pavimento. Mas foi registrado o escoamento subsuperficial que perdurou cerca de 20 minutos, atingindo a vazão de pico de 34,68 mm/h aos 13 minutos de ensaio.

Os tempos de embebição nos pavimentos foram de 18 segundos para a parcela PAV-II e de 10,6 minutos para a parcela PCP-II. A vazão de pico para PAV-II foi de 172,81 mm/h, o maior valor encontrado para os ensaios experimentais.

Nessas condições, o pavimento CCG-II foi o que apresentou o melhor desempenho hidrológico, pois apresentou escoamento superficial mínimo e um volume acumulado de armazenamento de 108 litros, correspondente a 80% do volume total de água precipitada.

Com relação ao ajuste dos dados de infiltração ao modelo de Horton (Figura 28), obteve-se para a parcela PAV-II o coeficiente de decaimento (K) de 25,67 h⁻¹ e o menor valor registrado para a capacidade de infiltração final (Io) igual a 7,98 mm/h, que sugere um comportamento limitado com relação ao controle na produção de escoamento superficial.

Nessas mesmas condições, os parâmetros de Green-Ampt foram Ko = 0,05 mm/h e $\Psi.\Delta\theta$ = 10000 mm. Esses valores apresentaram-se fora do esperado e indica um ajuste não satisfatório devido ao comportamento atípico no início do registro da infiltração, onde houve um decréscimo muito forte da taxa de infiltração.









Figura 27 - Escoamentos superficial, subsuperficial e infiltração nos PAV-II, PCP-II e CCG-II para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos.



Figura 28 – Ajustes dos dados de infiltração nos PAV-II para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos.

Os gráficos da saturação relativa média do solo durante os ensaios experimentais nos PAV-II, PCP-II e CCG-II para a simulação de chuva de intensidade 180 mm/h durante 15 minutos são apresentados na Figura 29, que mostra um comportamento diferenciado para a parcela PCP-II.

PCP-II



Figura 29 – Evolução da saturação do solo nos PAV-II, PCP-II e CCG-II para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos.

Apesar das condições iniciais de saturação relativa terem sido similares entre as parcelas experimentais, a parcela PCP-II apresentou um período de pico de saturação de cerca de 30 minutos, o que não ocorreu nas demais parcelas. Este resultado está diretamente relacionado ao registro de maior volume de escoamento de base (60,89 litros) em PCP-II.

A Figura 30 apresenta os gráficos dos resultados dos ensaios realizados nas mesmas parcelas PAV-II, PCP-II e CCG-II para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos.

Nessas condições não houve escoamento superficial nas parcelas PCP-II e CCG-II e não foi possível calcular a taxa de infiltração nestes pavimentos. Observou-se que o escoamento subsuperficial atingiu o pico mais rapidamente em PCP-II, sugerindo que o CCG-II apresentou um melhor desempenho hidrológico em relação ao PCP-II.









Figura 30 - Escoamentos superficial, subsuperficial e infiltração nos PAV-II, PCP-II e CCG-II para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos.



Figura 31 – Ajustes dos dados de infiltração no PAV-II para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos.

A saturação relativa média do solo durante os ensaios experimentais nos PAV-II, PCP-II e CCG-II para a simulação de chuva de intensidade 69 mm/h durante 45 minutos são apresentados na Figura 32.

Apesar da condição inicial de umidade em CCG-II ter sido mais elevada (saturação relativa = 35,5%) em comparação às demais parcelas PAV-II e PCP-II, observa-se que houve um decréscimo mais expressivo da saturação relativa no pavimento da parcela CCG-II, que indica uma maior dificuldade do pavimento em reter água.

PCP-II



Figura 32 – Evolução da saturação do solo nos PAV-II, PCP-II e CCG-II para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos.

5.2.3 Parcelas nas condições do TRECHO-III

Nas parcelas do Trecho III, cuja estrutura do pavimento possui espessura total mínima de 15 centímetros, observou-se que a maior parte do volume de água precipitada infiltrou e ficou armazenada na estrutura do pavimento. Dos seis ensaios de simulação de chuva, somente dois: PAV-III e CCG-III na simulação de 180 mm/h apresentaram escoamento superficial suficiente para calcular as taxas de infiltração.

Os resultados dos ensaios experimentais para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos são apresentados na Figura 33.

Apesar da parcela PCP-III ter apresentado um volume acumulado de escoamento subsuperficial considerável de 52 litros, esta apresentou o melhor desempenho hidrológico em comparação às demais parcelas, pois não apresentou escoamento superficial.

Na sequência, o CCG-III foi a parcela de melhor desempenho em relação ao PAV-III, pois apresentou o coeficiente de escoamento de 0,0028, muito inferior ao coeficiente de 0,19 do PAV-III.

Cabe ressaltar que o PCP-III foi a parcela que apresentou o menor volume acumulado de armazenamento (82,92 L) em comparação com as demais parcelas PAV-III e CCG-III, que apresentaram respectivamente 95,41 e 107,05 L. Isso significa que o CCG-III foi o pavimento que obteve melhor resultado em termos de armazenamento temporário de água em sua estrutura.









Figura 33 - Escoamentos superficial, subsuperficial e infiltração nos PAV-III, PCP-III e CCG-III para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos.


Figura 34 – Ajustes dos dados de infiltração no PAV-III para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos.

Os gráficos da saturação relativa (Figura 35) nos pavimentos durante os ensaios experimentais em PAV-III, PCP-III e CCG-III para a simulação de chuva de intensidade 180 mm/h durante 15 minutos, mostram que os pavimentos apresentaram condições iniciais de umidade entre 14 e 29%, chegando ao pico de 83% na parcela CCG-III, que sugere uma maior capacidade de retenção de água nessas condições.

PAV-III

PCP-III



Figura 35 – Evolução da saturação do solo nos PAV-III, PCP-III e CCG-III para a simulação de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos.

Para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos, não houve escoamento superficial em nenhuma das parcelas PAV-III, PCP-III e CCG-III. Os resultados se resumiram no hidrograma de escoamento subsuperficial (Figura 36). Os demais resultados, como os volumes de escoamento subsuperficial e de armazenamento são apresentados e discutidos mais a frente junto à análise estatística.

Na parcela PAV-III foi registrado o maior volume acumulado de armazenamento (133,09 litros) na estrutura do pavimento. No entanto, a parcela CCG-III foi a que registrou a maior duração do escoamento subsuperficial (130 minutos).



Figura 36 - Escoamento subsuperficial nos PAV-III, PCP-III e CCG-III para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos.

Nessas condições, pode-se concluir que PAV-III foi a parcela que apresentou os melhores resultados em termos de retenção de água no pavimento, conferido pelo maior volume acumulado (133,09 litros) de armazenamento no pavimento.

A saturação relativa média durante os ensaios experimentais nos PAV-III, PCP-III e CCG-III para a simulação de chuva de intensidade 69 mm/h durante 45 minutos variou de 20 a 39% na estrutura dos pavimentos (Figura 37). A parcela CCG-III apresentou valores de saturação de pico acima de 80%, que sugere uma maior capacidade de retenção de água e consequentemente um maior armazenamento temporário de águas de chuva.

PAV-III



Figura 37 – Evolução da saturação do solo nos PAV-III, PCP-III e CCG-III para a simulação de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos.

A síntese dos resultados dos coeficientes de escoamento e o balanço hídrico nas parcelas experimentais são apresentados na Tabela 7. O volume acumulado de infiltração (V inf) foi obtido pela diferença entre o volume acumulado de precipitação (V prec) e o volume acumulado de escoamento superficial (V esc). O volume acumulado de escoamento

PCP-III

subsuperficial (V base) foi medido diretamente no reservatório coletor e o volume acumulado de armazenamento (V arm) foi obtido pela diferença entre o V inf e o V base.

ENSAIO Data	Parcela	Simulação Chuva	С	V prec	V esc	V inf (litros)	V base (litros)	V arm (litros)	
Data	I – Re	evestimentos s	obre camao	la de areia	e solo não	compactado	(111103)	(1111 05)	
	1 – K	$\frac{180 \text{ mm/h}}{180 \text{ mm/h}}$			C 3010 11d0	compactado	,		
8/jul/2011	PAV	15 min	0,36	135	48,58	86,42	-	-	
14/abr/2011	PAV	69 mm/h 45 min	0,21	155,25	33,50	121,74	-	-	
7/abr/2011	PCP	180 mm/h	0,27	135	36,70	98,29	-	_	
4/abr/2011	PCP	69 mm/h	0,07	155,25	12,19	143,05	_	_	
2/abr/2011	CCG	180 mm/h	0,24	135	32,65	102,34	-	_	
3/abr/2011	CCG	69 mm/h 45 min	0,22	155,25	35,35	119,89	-	-	
II – Revestimentos sobre base de areia e solo compactado24/jun/2011PAV180 mm/h 15 min0,89135120,1114,891,7013,18									
24/jun/2011	PAV	180 mm/h 15 min	0,89	135	120,11	14,89	1,70	13,18	
29/abr/2011	PAV	69 mm/h 45 min	0,31	155,25	49,11	106,14	14,66	91,47	
22/jun/2011	PCP	180 mm/h 15 min	0,03	135	4,02	130,98	60,89	70,08	
4/mai/2011	PCP	69 mm/h 45 min	0,00	155,25	0,00	155,25	38,91	116,33	
10/mai/2011	CCG	180 mm/h 15 min	4 x 10 ⁻⁴	135	0,05	134,94	26,92	108,02	
12/mai/2011	CCG	69 mm/h 45 min	0,00	155,25	0,00	155,25	28,50	126,74	
I	II – Revest	imentos sobre	base de ar	eia, sub-ba	se de brita	e solo comp	actado		
14/mai/2011	PAV	180 mm/h 15 min	0,19	135	26,59	108,40	12,99	95,41	
16/mai/2011	PAV	69 mm/h 45 min	0,00	155,25	0,00	155,25	22,15	133,09	
18/mai/2011	PCP	180 mm/h 15 min	0,00	135	0,00	135	52,07	82,92	
23/mai/2011	PCP	69 mm/h 45 min	0,00	155,25	0,00	155,25	41,35	113,90	
25/mai/2011	CCG	180 mm/h 15 min	0,0028	135	0,38	134,61	27,56	107,05	
27/mai/2011	CCG	69 mm/h 45 min	0,00	155,25	0,00	155,25	53,13	102,11	

Tabela 7 - Coeficientes de escoamento e volumes acumulados obtidos dos ensaios experimentais.

Em que: C - coeficiente de escoamento superficial; V prec - volume acumulado de precipitação; V esc - volume acumulado de escoamento superficial; V inf - volume acumulado de infiltração; V base - volume acumulado de escoamento subsuperficial; V arm - volume acumulado de armazenamento.

Os pavimentos que apresentaram os maiores valores para o coeficiente de escoamento foram os revestidos com blocos pré-moldados de concreto maciço (PAV), o que indica condições menos favoráveis ao controle do escoamento superficial em comparação com os demais tipos de revestimento avaliados.

No entanto, os resultados da análise estatística mostraram que não houve diferença significativa ao nível de 5% para os coeficientes de escoamento, volume total de escoamento superficial e volume total de infiltração em comparação aos tipos de revestimento (Tabela 8) e às condições estruturais de pavimentação (Tabela 9).

			Desvio	IC (95%)		
Variável / Revestimento	n	Média	Padrão	Inferior	Inferior Superior	
Coeficiente de escoamento						
PAV	6	0,33	0,30	0,01	0,64	
PCP	6	0,06	0,11	0,00	0,17	0,060
CCG	6	0,08	0,12	0,00	0,20	
Volume total escoamento superficial						
PAV	6	46,32	40,39	3,93	88,70	
PCP	6	8,82	14,46	0,00	23,99	0,050
CCG	6	11,41	17,52	0,00	29,79	
Volume total infiltração						
PAV	6	98,81	47,02	49,47	148,15	
PCP	6	132,92	19,04	112,94	152,90	0,109
CCG	6	137,10	22,36	113,64	160,56	

Tabela 8 – Média, desvio padrão, intervalos de confiança (IC) e valor de p das variáveis: coeficiente de escoamento, volume total de escoamento superficial e volume total de infiltração, por tipo de revestimento.

Teste: ANOVA (p<0,05 indica diferença significativa entre as médias comparadas; n = número de amostras).

Com relação ao volume acumulado de armazenamento (V arm) nas parcelas dos Trechos II e III, observou-se que em média 70% do volume precipitado acumula-se na estrutura do pavimento, o que indica um resultado importante com relação à função destes tipos de pavimentos no armazenamento temporário da água de chuva, que se infiltra no solo lentamente.

E com base nos resultados encontrados para o volume de armazenamento de água nos pavimentos avaliados, pode-se concluir que uma camada de base granular (areia ou brita) de até 10 centímetros de espessura é suficiente para armazenar a maior parte do volume total de água de eventos naturais de precipitação de até 50 mm.

Variánal / Estimationa		Mádia	Desvio	IC(95%)		
	n	Media	Padrão	Inferior	Superior	р
Coeficiente de escoamento						
TRECHO I	6	0,23	0,09	0,13	0,33	
TRECHO II	6	0,21	0,36	0,00	0,58	0,265
TRECHO III	6	0,03	0,08	0,00	0,11	
Volume total escoamento superficial						
TRECHO I	6	33,16	11,79	20,79	45,54	
TRECHO II	6	28,88	48,68	0,00	79,97	0,227
TRECHO III	6	4,50	10,83	0,00	15,86	
Volume total infiltração						
TRECHO I	6	111,96	20,28	90,67	133,24	
TRECHO II	6	116,24	52,89	60,74	171,74	0,326
TRECHO III	6	140,63	18,70	121,01	160,25	

Tabela 9 – Média, desvio padrão, intervalos de confiança (IC) e valor de p das variáveis: coeficiente de escoamento, volume total de escoamento superficial, volume total de infiltração, volume total de escoamento subsuperficial, volume total armazenado no pavimento, por estrutura.

Teste: ANOVA (*p<0,05 indica diferença significativa entre as médias comparadas; n = número de amostras).

Nos casos em que houve escoamento superficial foram determinados o tempo de embebição (t_e), o tempo e a vazão de pico (t_p e Q_p) e o tempo decorrido do início da precipitação até o final do escoamento superficial (t_f) (Tabela 10) a partir do detalhamento dos hidrogramas de cada ensaio experimental.

Parcela	Simulação Chuva	t _e (s)	t _p (s)	t _f (s)	Q _p (mm/h)
I –	Revestimentos sobre car	nada de ar	eia e solo nã	io compacta	ido
PAV	180 mm/h e 15 min	48	930	1200	91,8
PAV	69 mm/h e 45 min	168	2700	3120	23,51
PCP	180 mm/h e 15 min	432	900	1410	94,04
PCP	69 mm/h e 45 min	1824	2580	3090	18,81
CCG	180 mm/h e 15 min	192	780	1650	41,73
CCG	69 mm/h e 45 min	864	2490	3330	26,45
	II - Revestimentos sobre	e base de a	reia e solo c	ompactado	
PAV	180 mm/h e 15 min	18	900	1290	172,81
PAV	69 mm/h e 45 min	192	1980	2940	33,50
PCP	180 mm/h e 15 min	636	810	960	19,83
PCP	69 mm/h e 45 min	-	-	-	-
CCG	180 mm/h e 15 min	-	-	-	-
CCG	69 mm/h e 45 min	-	-	-	-
III – Rev	estimentos sobre base de	areia, sub	-base de brit	a e solo coi	npactado
PAV	180 mm/h e 15 min	162	900	990	67,00
PAV	69 mm/h e 45 min	-	-	-	-
PCP	180 mm/h e 15 min	-	-	-	-
PCP	69 mm/h e 45 min	-	-	-	-
CCG	180 mm/h e 15 min	630	870	990	1,76
CCG	69 mm/h e 45 min	-	-	-	-

Tabela 10 - Vazão de pico e fases dos ensaios experimentais.

Os resultados da análise estatística dos tempos de embebição (t_e) , de pico (t_p) , final do escoamento superficial (t_f) e da vazão de pico (Qp) são apresentados por tipo de revestimento na Tabela 11.

Os tempos de embebição (t_e), quando comparados entre os tipos de revestimento apresentaram diferença significativa ao nível de 5%. Nesta situação, o revestimento PCP apresentou valor médio superior aos demais tipos de revestimento, seguido do CCG e PAV. Isso significa que o revestimento PCP contribuiu mais expressivamente para o retardo do escoamento superficial e possibilitou um maior armazenamento temporário de água em sua estrutura. As demais variáveis: tempo de pico (t_p), tempo final do escoamento superficial (t_f) e vazão de pico (Qp) não apresentaram diferença significativa quando comparados entre os tipos de revestimento.

Tabela 11 – Média, Desvio Padrão e Intervalo de Confiança da média da vazão de pico (Qp) e de cada tempo (te, tp e tf), por tipo de revestimento.

Variável /		Mádia	DD	IC(9		
Revestimento	n	Media	DP	Inferior	Superior	р
t _e						
PAV	5	117,6	78,8	19,8	215,4	
PCP	3	964,0	751,7	0,0	2831,4	0,027*
CCG	3	562,0	341,1	0,0	1409,4	
t _p						
PAV	5	1482,0	823,6	0,0	2387,3	
PCP	3	1430,0	996,9	0,0	2476,6	0,495
CCG	3	1380,0	962,3	0,0	2408,9	
t _f						
PAV	5	1908,0	1031,9	0,0	3141,2	
PCP	3	1820,0	1122,6	0,0	3207,8	0,387
CCG	3	1990	1206,5	0,0	3383,8	
Qp						
PAV	5	77,7	59,7	3,6	151,8	
PCP	3	44,2	43,1	0,0	151,4	0,334
CCG	3	23,3	20,2	0,0	73,4	

Teste: Kruskal Wallis (*p<0,05 indica diferença significativa entre as médias comparadas; n = número de amostras).

Os parâmetros do ajuste dos dados de infiltração ao modelo de Horton são apresentados na Tabela 12 para todos os ensaios experimentais em que foi possível realizar o ajuste.

Parcela	Simulação Chuva	Io (mm/h)	If (mm/h)	К (h ⁻¹)	R ²		
I – Revestimentos sobre camada de areia e solo não compactado							
PAV	180 mm/h e 15 min	180,00	111,65	20,25	0,86		
PAV	69 mm/h e 45 min	68,81	40,82	2,36	0,97		
PCP	180 mm/h e 15 min	180,00	21,00	6,28	0,96		
PCP	69 mm/h e 45 min	69,00	48,64	10,48	0,97		
CCG	180 mm/h e 15 min	180,00	138,37	56,01	0,99		
CCG	69 mm/h e 45 min	71,03	38,92	5,09	0,96		
	II – Revestimentos sobre base de areia e solo compactado						
PAV	180 mm/h e 15 min	204,79	7,98	25,67	0,96		
PAV	69 mm/h e 45 min	67,02	32,48	3,84	0,97		
III – Rev	vestimentos sobre base de	areia, sub-ba	ase de brita e	e solo compac	tado		
PAV	180 mm/h e 15 min	173,66	41,81	2,74	0,92		

Tabela 12 – Parâmetros do ajuste dos dados de infiltração ao modelo de Horton para as parcelas experimentais.

Os coeficientes de decaimento (K) do modelo de Horton apresentaram maiores valores para o pavimento CCG-I, provavelmente devido à composição do revestimento, que possui solo e grama. Esse resultado (K = 56,01 h⁻¹) associado ao maior valor obtido para a capacidade final de infiltração (I = 138,37 mm/h) indica um melhor comportamento para esse pavimento com relação ao controle na produção de escoamento superficial.

Os parâmetros do ajuste dos dados de infiltração ao modelo de Green-Ampt são apresentados na Tabela 13 para todos os ensaios experimentais em que foi possível realizar o ajuste.

Parcela	Simulação Chuva	Ko (mm/h)	Ψ.Δθ (mm)	\mathbf{R}^2	
I – Revestimentos sobre camada de areia e solo não compactado					
PAV	180 mm/h e 15 min	93,60	5,18	0,95	
PAV	69 mm/h e 45 min	42,67	5,08	0,93	
PCP	180 mm/h e 15 min	0,87	4957,00	0,96	
PCP	69 mm/h e 45 min	21,14	72,07	0,96	
CCG	180 mm/h e 15 min	114,77	5,65	0,92	
CCG	69 mm/h e 45 min	16,76	59,31	0,98	
II – Revestimentos sobre base de areia e solo compactado					
PAV	180 mm/h e 15 min	0,05	10000,00	0,90	
PAV	69 mm/h e 45 min	30,68	8,08	0,95	
III – Revestimentos sobre base de areia, sub-base de brita e solo compactado					
PAV	180 mm/h e 15 min	96,27	11,15	0,90	

Tabela 13 – Parâmetros do ajuste dos dados de infiltração ao modelo de Green-Ampt para as parcelas experimentais.

Os valores obtidos para a condutividade hidráulica do solo saturado (Ko) do modelo de Green-Ampt apresentaram maiores valores para os pavimentos CCG-I, PAV-III e PAV-I na intensidade de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos, que sugere uma maior capacidade destes pavimentos em reter e conduzir água.

Os demais valores obtidos para o potencial matricial médio na frente de umedecimento (Ψ) do modelo de Green-Ampt estão associados à variação de umidade no pavimento ($\Delta \theta$) e apresentaram maiores valores para os pavimentos PCP-I e CCG-I na intensidade de chuva de 69 mm/h durante 45 minutos. Em PCP-I e PAV-II esses valores apresentaram-se muito altos para a intensidade de chuva de 180 mm/h durante 15 minutos, que indica um ajuste não satisfatório devido ao comportamento atípico no início do registro da infiltração, onde houve um decréscimo muito forte da taxa de infiltração.

5.3 Prova de carga estática

Os resultados dos ensaios da prova de carga estática sobre os pavimentos permeáveis são apresentados na Figura 38 e mostram os diferentes comportamentos entre os revestimentos testados. Os gráficos relacionam o deslocamento em milímetros com a pressão aplicada em quilopascal (kPa).



CCG-I

Figura 38 - Curvas da prova de carga estática sobre os pavimentos permeáveis na condição I.

O revestimento de blocos de concreto vazado (concregrama) mostrou-se mais resistente em comparação com os demais tipos de revestimento e apresentou comportamento similar a pavimentos convencionais de rodagem de veículos.

A placa de concreto poroso e o bloco de concreto maciço (*paver*) apresentaram deslocamentos irreversíveis após o ensaio de prova de carga estática. E alguns blocos de *paver* apresentaram trincas e rachaduras após a execução do ensaio (Figura 39).



Figura 39 – Aparência dos revestimentos dos pavimentos após a execução dos ensaios de prova de carga estática. (A) Afundamento da estrutura do pavimento – PAV; (B) Rachaduras transversais - PAV; (C) Afundamento da estrutura do pavimento PCP.

Em síntese, pode-se sugerir que nessas condições, os pavimentos PAV-I e PCP-I não são recomendados para o uso em estacionamentos, acessos e locais de passagem de veículos, pois não suportam cargas mais elevadas.

6. DIRETRIZES CONSTRUTIVAS PARA PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Com base nos resultados deste trabalho propôs-se as seguintes diretrizes para a escolha, dimensionamento e construção de pavimentos permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial nas regiões mais urbanizadas do município de Goiânia.

1) Definição do tipo de uso e local

O uso dos pavimentos analisados neste estudo estará restrito a calçamentos, passeios, estacionamentos e pequenos acessos de veículos leves. O local de construção do pavimento permeável deverá priorizar as áreas externas e também as áreas que poderão receber fluxo de água.

2) Escolha do revestimento

Os revestimentos deverão atender preferencialmente às normas NBR 9780 (ABNT, 1987a) e NBR 9781 (ABNT, 1987b), que fixam as condições exigíveis para a

aceitação de peças pré-moldadas de concreto, destinadas à pavimentação de vias urbanas, pátios de estacionamento ou similares, com relação à resistência à compressão e qualidade das peças.

Revestimentos de espessura de 6 a 10 centímetros geralmente são suficientes para suportar o tráfego veículos leves. No caso de solicitação mais severa, optar por revestimentos mais resistentes de espessura mínima de 10 centímetros.

3) Considerações sobre o subleito

O subleito deverá estar regularizado e compactado na cota de projeto pra receber as demais camadas do pavimento. Recomenda-se o reconhecimento geotécnico pelo método CBR (*California Bearing Ratio*) que deve ser de no mínimo 2% e expansão menor que 2%. Caso contrário, proceder com uma camada de reforço utilizando material de CBR e expansão adequados.

A compactação do solo do subleito poderá ser realizada utilizando-se de um compactador mecânico a gasolina ("sapo mecânico"), após a umidificação e homogeneização do solo na superfície.

4) Estrutura e construção do pavimento

A estrutura recomendada do pavimento, ilustrado na Figura 40, deve ser composto por subleito de solo compactado conforme as considerações do item 3. Aplicar a manta geotêxtil permeável para receber a camada de sub-base, que deve ser composta de material granular resistente, como a brita tipo 1, em espessura média de 10 centímetros, que após ser compactada atingirá os 7 centímetros de espessura recomendado. Aplicar a manta geotêxtil permeável para receber a próxima camada de base de areia média em uma espessura média de 10 centímetros, que após ser umidificada e compactada também atingirá os 7 centímetros de espessura recomendado.



Figura 40 - Estrutura e dimensões do pavimento permeável recomendado.

Por fim, após o nivelamento da base que receberá o revestimento, deve-se assentar as peças de concreto pré-moldado firmemente pressionadas e aplicar uma fina camada de areia sobre os blocos para o preenchimento das juntas e volumes vazios na superfície.

Alternativamente, pode-se utilizar como material de sub-base cascalho de diâmetro de 5mm (retido na peneira de 4,8mm), conforme utilizado por Abbott e Comino-Mateos (2003).

5) Manutenção

Para a manutenção das características de permeabilidade, drenagem e prolongamento da vida útil do pavimento, deve-se realizar limpezas periódicas da superfície do revestimento principalmente na época de estiagens de chuva, de modo a evitar o acúmulo de sedimentos (colmatação) na superfície do pavimento.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados dos ensaios experimentais sobre os pavimentos permeáveis avaliados neste trabalho mostraram que esses dispositivos contribuem na redução do escoamento superficial, em razão dos baixos coeficientes de escoamento (0 a 0,36) obtidos.

Os pavimentos PCP-II, PCP-III, CCG-II, CCG-III e PAV-III apresentaram pouco ou nenhum escoamento superficial, o que evidencia os potenciais dessas condições no controle e redução do escoamento superficial.

No geral, o revestimento PAV apresentou resultados satisfatórios somente sob simulação de chuvas de menor intensidade, não sendo recomendado para locais sujeitos a chuvas de altas intensidades (maior que 69 mm/h) ou locais que possuem solo de drenagem natural limitada.

Os altos valores registrados de volume acumulado de infiltração (27 a 45,51mm) atribuem aos pavimentos avaliados um resultado positivo na contribuição ao armazenamento temporário de águas de chuva e no incremento da infiltração de água no solo urbano.

O retardo e o prolongamento nos tempos críticos do hidrograma de escoamento superficial também garantiram bons resultados ao revestimento PCP, que no geral apresentou os maiores tempos de embebição (7,2 a 30,4 minutos) em comparação aos demais tipos de revestimento.

A estrutura que apresentou o melhor desempenho hidrológico foi o Trecho III, cujos resultados variaram de 0 a 0,19 para o coeficiente de escoamento.

No Trecho II, somente as combinações PCP-II e CCG-II apresentaram resultados positivos em termos de desempenho hidrológico, pois apresentaram pouco ou nenhum

escoamento superficial, conferido pelos baixos coeficientes de escoamento que variaram de 0 a 0,03.

As diretrizes construtivas do tipo de pavimento permeável que obteve melhor desempenho foram traçadas e descritas na seção 6.

Para um melhor reconhecimento e modelagem do comportamento da infiltração de água nos pavimentos e no solo sugere-se utilizar também outros modelos, tais como: método da curva-número (SCS - *Soil Conservation Service*), algoritmo de Berthelot, equação de Philip, dentre outros.

A construção de pavimentos permeáveis em áreas maiores como estacionamentos e vias de acessos de veículos leves, e o monitoramento de eventos naturais de chuva também são avaliações que devem contribuir no melhor entendimento do desempenho desses dispositivos.

E para obter resultados mais abrangentes, recomenda-se simular outras intensidades de chuva, assim como monitorar eventos naturais de chuva. Um maior número de ensaios também é recomendado, de modo que o número de amostras seja maior e possibilite análises estatísticas mais precisas.

Apesar de não ter sido realizado neste trabalho, outra avaliação importante é com relação à qualidade da água escoada e retida pela estrutura dos pavimentos permeáveis, que pode ser realizada a partir da precipitação simulada de uma concentração conhecida de determinado poluente.

O efeito do acúmulo de materiais finos na superfície dos revestimentos (colmatação) e sua relação com a capacidade de infiltração de água no pavimento, também é uma análise importante principalmente a longo prazo, o que não foi realizado neste trabalho.

Outros tipos de revestimentos como concreto asfáltico poroso, geocélulas e diferentes formatos de peças pré-moldadas também merecem atenção em estudos e pesquisas.

O desenvolvimento de modelos matemáticos que representem o comportamento de pavimentos permeáveis também é uma forma de melhorar o entendimento a cerca da funcionalidade e eficiência dos pavimentos permeáveis com vistas ao aperfeiçoamento dos processos de infiltração em áreas urbanas.

ABBOTT, C. L.; COMINO-MATEOS, L. In-situ hydraulic performance of a permeable pavement sustainable urban drainage system. **The Journal.** 17 (3), 187-190, 2003.

ABITANTE, E.; TRICHÊS, G.; STRIANI, C. S. **Controle de compactação de solos com uso do DCP = Control de compactación de suelos com uso del DCP.** Tradução Gerson Vasconcelos de Freitas. Florianópolis: Imprensa da UFSC. Edição bilíngüe: Português/espanhol. 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 1984b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 7181: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984d.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 1986a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 7182: Solo – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, 1986b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 7185: Solo – Determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia.** Rio de Janeiro, 1986c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 9780: Peças de Concreto para Pavimentação – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1987a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 9781: Peças de Concreto para Pavimentação. Rio de Janeiro, 1987b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 9895: Solo – Índice de Suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 1987c.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 12051: Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos. Rio de Janeiro, 1991. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR – 6502: Rochas e solos - terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** Rio de Janeiro, 2000.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM – 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2002a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM – 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2002b.

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte.** Dissertação de mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2005.

ANDERSEN, C. T.; FOSTER, I. D. L.; PRATT, C. J. The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment. **Hydrological Processes.** 13 (4), p. 597-609, 1999.

ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M. e GOLDENFUM, J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. **Rev. Bras. Recursos Hídricos.** 5 (3), p. 21-29, 2000.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 6951 – 03: Standard test method for use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications. West Conshohocken, PA, 2003.

BEIRIGO, E. A. **Comportamento Filtro-Drenante de Geotêxteis em Barragens de Rejeitos de Mineração.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2005.

BRATTEBO, B. O.; BOOTH, D. B. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. **Water Research.** 37, p. 4369-4376, 2003.

BRITO, D. S. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2006.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes.** São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

CECÍLIO, R. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. e MARTINEZ, M. A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. **Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambiental.** 7(3), p. 415-422, 2003.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied Hydrology. McGraw-Hill, 1994.

CLARK, S.; PITT, R.; BURIAN, S. Annotated bibliography of urban wet weather flow literature from 1996 through 2006. Edison, NJ: U. S. Environmental Protection Agency, 2007.

COSTA, A. R.; MENEZES FILHO, F. C. M.; ALVES, F. A. O; SIQUEIRA, E. Q. **Curso Básico de Hidrologia Urbana**. Brasília: Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental – ReCESA, 2007.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Norma 055 – ME. Pavimento rígido – Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos – Método de ensaio. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro, 2004.

FERGUSON, B. K. Porous pavements. Boca Raton: CRC Press, 2005.

FERGUSON, B. K. Stormwater infiltration. Boca Raton: Lewis, 1994.

GENZ, F. **Parâmetros para a previsão e controle de cheias urbanas.** Dissertação de mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 1994.

GOIÂNIA, GO. Lei complementar municipal nº 171 de 29 de maio de 2007. Dispõe sobre o Plano Diretor e o processo de planejamento urbano do Município de Goiânia, GO.

GOIÂNIA, GO. Lei complementar municipal nº 177 de 9 de janeiro de 2008. Dispõe sobre o Código de Obras e Edificações do Município de Goiânia, GO.

HUNT, W. F.; COLLINS, K. A. Permeable pavements: research update and design implications. In: **Urban Waterways.** North Caroline State University Cooperative Extension. [2008].

MAYS, L. W. Water resources engineering. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2001.

MELO, F. M. Equação de Green-Ampt para a infiltração de água no solo: arproximações numéricas para explicitação do volume infiltrado. **Rev. de Ciências Agrárias**, 31(1), p. 31-15, 2008.

MENEZES FILHO, F. C. M. **Sistematização para projeto de galeria de águas pluviais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente, Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO. 2007 MOURA, T. A. M. **Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial em ambientes urbanos.** Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2005.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas.** 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

SÃO PAULO, SP. **IP-06 Instrução para dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto**. Prefeitura Municipal de São Paulo. Secretaria de infra-estrutura urbana. Disponível em : http://ww2.prefeitura.sp.gov.br//arquivos/secretarias/infraestrutura urbana/normas_tecnicas_de_pavimentacao. Acesso em: 11 de abril de 2010.

SCHOLZ, M.; GRABOWIECKI, P. Review of permeable pavement systems. **Building and Environment**. vol. 42, 2007, p. 3830 – 3836.

SIQUEIRA, E. Q.; FORMIGA, K. T. M.; SILVA, K. A. **Diretrizes projetuais de dispositivos de detenção e aproveitamento de água de chuva em obras de infra-estrutura urbana e edificações de Goiânia (GO).** Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Go. Proposta de Financiamento: FUNAPE-GO-EEC-UFG-DRENAG, 2007.

SILVA, G. B. L. **Avaliação experimental sobre superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas.** Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2006.

SILVA, K. A. Análise da eficiência de métodos de controle de enchentes na atenuação de picos de cheias utilizando o modelo computacional SWMM – Storm water managemente model. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente, Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO. 2007.

SINGH, V. P. Hydrologic Systems. Vol. II: Watershed Modeling. New Jersey: Prentice Hall. 1989.

SMITH, D. R. Permeable interlocking concrete pavements: selection, design, construction and maintence. 3^a ed. Washington, DC: ICPI – Interlocking Concrete Pavement Institute. 2006.

SOUSA JUNIOR, S. F. Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuva para estudos hidrológicos urbanos. Dissertação a ser apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente. Agosto de 2011.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. (org.). **Drenagem urbana.** Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1995.

TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 3ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2002.

VIESSMAN JR, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to Hydrology**. 4^a ed. New York: HarperCollins College Publishers, 1996.

WRIGHT, L. T.; HEANEY, J. P. Design of distributed stormwater control and re-use systems. In: **Stormwater Collection systems Design Hankbook.** McGraw-Hill. 2004. Chap. 11 – Design of distributed stormwater control and re-use systems. Disponível em: http://www.digitalengineeringlibrary.com. Acesso em: 11 de novembro de 2009.

APÊNDICES