XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

O DESEMPENHO DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Liliane L. C. Alves Pinto [1]; José Rodolfo S. Martins [2]; Rubem La Laina Porto[3]

Resumo – Foram implantados dois módulos de pavimentos permeáveis com revestimento de blocos de concreto de cimento Portland permeável e concreto poroso asfáltico, respectivamente formados pela base convencional da pavimentação em um estacionamento e para tráfego de veículos leves na Universidade de São Paulo dentro do Centro Tecnológico de Hidráulica. Este exeperimento contou com o apoio financeiro da Prefeitura de São Paulo. Os pavimentos permeáveis estudados são do tipo sem infiltração no solo.
Durante seis meses estes protótios foram monitorados. A instrumentação constou de uma estação pluviométrica e quatro sensores de nível instalados em caixas coletoras dotadas de vertedouros. Durante a pesquisa foi desenvolvido um modelo matemático para validação do modelo físico e calibrado a partir dos eventos observados.
A utilização de reservatórios subterrâneos formados pela base porosa utilizada na pavimentação de vias desponta como uma variante eficaz para o armazenamento temporário de volumes precipitados, constituindo-se em uma alternativa simples aos grandes reservatórios de detenção. Entretanto, estas medidas ainda estão longe de prover a sustentabilidade quando implantadas isoladamente.
Este estudo pretende apresentar o desempenho dos pavimentos permeáveis, que são técnicas compensatórias e que têm se mostrado muito eficientes, em relação à porcentagem de amortecimento promovida no sistema de drenagem.

Abstract – Two modules of permeable paving were implanted covered with permeable interlocking concrete pavement and porous pavement, respectively formed by the base in a conventional paving for parking and light vehicle traffic at the University of São Paulo in the Hydraulic Technology Center. This experiment had the financial support of São Paulo City Hall. The permeable paving type studied are no infiltration into the soil.
For six months, these prototypes were monitored. The instrumentation consisted of a rainfall station and four level sensors installed in collecting boxes equipped with spillways. During the research was developed a mathematical model to validate the physical model and calibrated from the observed events.
The use of underground reservoirs formed by porous base used for paving roads has emerged as an effective variant for the temporary storage volume precipitates, thus becoming a simple alternative to big reservoirs. However, these measures are still far from providing sustainability when implanted alone.
This study aims to present the performance of permeable paving, which are compensatory and techniques that have proven very effective in relation to the percentage damping promoted into the drainage system.

Palavras-Chave – pavimento permeável, reservatórios subterrâneos, enchentes urbanas.

[1] Profª Drª , consultora independente, R. Ministro João Mendes, 30 – Santos/SP CEP 11040-260,(13)3227-5089, fax(13)3235-1262,rlap@uol.com.br
[2] Prof.Dr.do Departamento de Hidráulica da Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Almeida Prado, 83- Trav.2, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo, SP,(11) 3091-5581, scarati@usp.br
[3] Prof.Dr.do Departamento de Hidráulica da Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Almeida Prado, 83- Trav.2, Cidade Universitária, 05508-900, São Paulo, SP,(11) 3091-5549,rlporto@usp.br

1. INTRODUÇÃO

A impermeabilização gerada ao longo das últimas décadas em decorrência da urbanização muitas vezes, implantada sem o planejamento necessário causou a ocupação de várzeas, parques e campos ajardinados, responsáveis pela recarga de lençóis freáticos e pela infiltração da água no solo urbano.

Na última década a preocupação com o meio urbano aliada as questões ambientais tornou-se parte do cotidiano fazendo com que o meio técnico buscasse técnicas capazes de mitigar ou compensar os impactos causados pela impermeabilização do solo urbano. Surgiram as chamadas técnicas compensatórias em drenagem urbana ou as medidas de controle compensatórias (Baptista *et al,* 2005). Essas técnicas tem entre outras, a função de mitigar ou controlar os efeitos causados pelas chuvas em áreas densamente urbanizadas e podem interferir no hidrograma por meio de armazenamento do escoamento superficial direto, percolação e infiltração. Porém isoladamente, essas estruturas não promovem o controle de inundações e são destinadas ao manejo de águas pluviais. Uma dessas técnicas utilizadas há mais de vinte anos na Europa e Estados Unidos, porém ainda pouco conhecida no Brasil, é o pavimento permeável.

A utilização de reservatórios subterrâneos formados pela base porosa utilizada na pavimentação de vias desponta como uma variante eficaz para o armazenamento temporário de volumes precipitados, constituindo-se numa alternativa simples aos grandes reservatórios de detenção. Entretanto, estas medidas ainda estão longe de prover a sustentabilidade quando implantadas isoladamente.

Este trabalho apresenta os resultados relacionados ao desempenho de pavimentos permeáveis obtidos com os estudos realizados a partir da implantação de um modelo físico no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH), com suporte da Prefeitura do Município de São Paulo. O protótipo consiste em uma pista experimental destinada ao estacionamento de veículos e tráfego leve.

2. METODOLOGIA

2.2 Definição do modelo físico – protótipos

Foram implantadas duas pistas experimentais destinadas ao estacionamento de veículos e tráfego leve nas dependências do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH).

A função principal deste modelo é permitir o armazenamento da precipitação em suas camadas de base e sub-base sem, entretanto, infiltrá-la para a camada de subleito, e principalmente, mantendo as características de suporte estrutural da pavimentação. Portanto, este dispositivo será tratado aqui como uma estrutura viária, porém com finalidades hidrológico-hidráulicas. O conceito clássico de projeto de pavimentos segundo o qual, deve-se retirar a água da base do pavimento o mais rapidamente possível, no caso de pavimentos permeáveis precisa ser reavaliado (Diniz, 1980).

O estacionamento projetado é dotado de dois módulos, cada um com seu reservatório subterrâneo formado pela base estrutural da pavimentação, com vistas à captação e armazenamento temporário de águas de chuva. O lay-out e a seção transversal dos módulos experimentais podem ser vistos na **Figura 1** e na **Figura 2**. Um módulo foi projetado com revestimento de blocos intertravados de concreto permeável (BCP) e o outro com concreto poroso asfáltico (CPA).

Na elaboração do projeto hidráulico do modelo físico composto de dois módulos de pavimento permeável considerou-se para a definição do volume necessário da camada reservatório a ser preenchida com material granular as seguintes premissas:

- Equação I-D-F desenvolvida por Martinez & Magni (1999) a partir de dados do posto IAG/USP – E3-035 da cidade de São Paulo;
- Porosidade do material de preenchimento da camada reservatório;
- Características físicas da seção transversal dos módulos experimentais, como declividades de fundo e dimensões dos módulos (Figura 1e Figura 2).

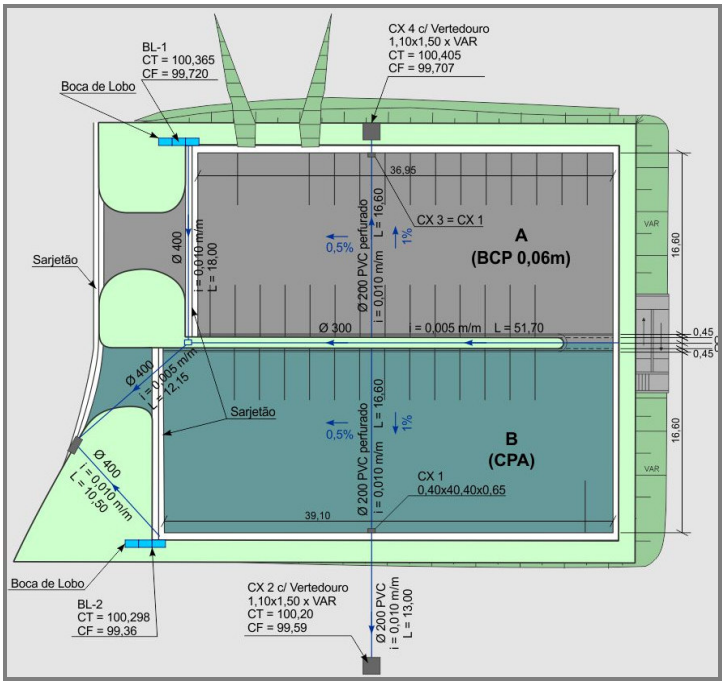


Figura 1 – Layout do protótipo

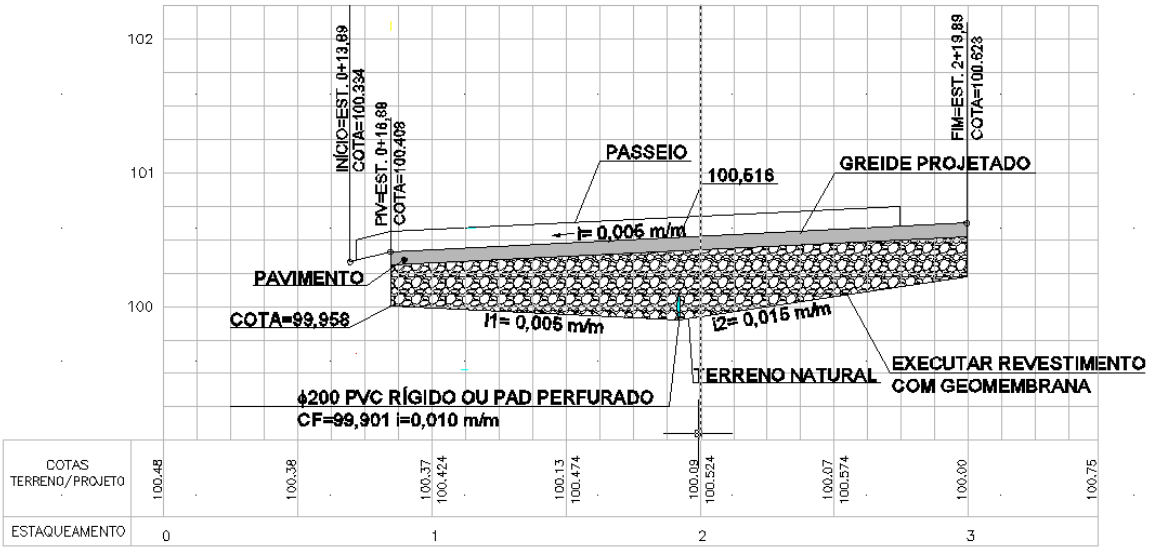


Figura 2 – Seção transversal tipo

Em virtude de pequenas diferenças entre as dimensões do módulo revestido com BCP e do módulo revestido com CPA resultantes da topografia e do lay-out dos jardins, todos os cálculos foram elaborados separadamente. A planilha com as espessuras das camadas reservatório resultantes é apresentada a seguir. Inicialmente, foram elaborados cálculos para diversas situações, ou seja, para tempos de concentração variando entre 10 e 4320 minutos (72 horas), Períodos de Retorno entre 2 e 200 anos e porosidades variando entre 25% e 40%.

A espessura do reservatório foi calculada inicialmente, a partir da seguinte equação:

$$H = \frac{V_{máx}}{\mu} = \frac{P}{\mu} \qquad (1)$$

Na qual,

H = espessura da camada reservatório (mm)

$V_{máx}$ = volume máximo da camada reservatório (mm)

μ = porosidade do material de preenchimento da camada reservatório

P = precipitação de projeto (mm)

Os módulos experimentais propostos são do tipo **sem infiltração**, dessa forma houve a necessidade de captação da contribuição subsuperficial por meio de drenos instalados no fundo do pavimento projetado, e de sistema de micro-drenagem composto por guias, sarjetas e bocas de lobo para captação do escoamento superficial.

Imagina-se que ocorrerá escoamento superficial, principalmente, na ocorrência de precipitações de maior intensidade e continuas. Este tipo de chuva provavelmente acarretará, nos primeiros anos do experimento, a saturação da camada reservatório e a formação de lâminas d'água

na superfície dos dois módulos. Provavelmente, com o passar dos anos em função da periodicidade na manutenção ou não, o entupimento dos poros dos pavimentos ocorrerá e então, o escoamento superficial passará a ser em maior volume. Diniz (1980) propõe que a manutenção seja efetuada quatro vezes ao ano com equipamentos de alta pressão e afirma que essa manutenção é eficiente na recuperação da capacidade de armazenamento da camada reservatório.

Para a captação do escoamento subsuperficial foi projetada uma estrutura que drena para o centro dos módulos (**Figura 2**). A declividade longitudinal da superfície dos módulos é continua e igual a 0,005 m/m e drena diretamente para um ponto específico onde está localizada uma boca de lobo em cada um dos módulos (**Figura 1**).

Para captação do escoamento subsuperficial, para possibilitar o monitoramento com a instrumentação de maneira eficiente e garantir o esvaziamento do reservatório, foi criado um ponto baixo no eixo de cada um dos módulos e instalados drenos perfurados. Para a implantação deste ponto baixo não foi possível a adoção da mesma declividade nos dois lados, em função da topografia do local e do layout das estruturas existentes havendo a necessidade de obediência às cotas de guia o que resultou na concepção apresentada na Figura 2. As declividades adotadas foram i_1 = 0,005 m/m e i_2 = 0,015 m/m, que podem ser alteradas na ocasião de outro projeto. Este fato motivou a utilização de outra equação para a definição da espessura resultante da camada reservatório para cada um dos módulos. A espessura foi então, calculada em função do comprimento e da declividade de fundo ponderados para cada módulo conforme equação a seguir adaptada de Acioli (2005):

$$H' = H + \left(\frac{I_1 \cdot L_1}{2} + \frac{I_2 \cdot L_2}{2}\right) \qquad \textbf{(2)}$$

Na qual:

H'= espessura média da camada reservatório (mm)

H = espessura da camada reservatório (mm)

I_1 = declividade adotada no projeto na direção 1(m/m)

L_1 = comprimento do reservatório na direção 1 (m)

I_2 = declividade adotada no projeto na direção 2 (m/m)

L_2 = comprimento do reservatório na direção 2 (m)

As dimensões longitudinais de fundo dos dois módulos podem ser vistas na Tabela 1 e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 1.Dimensões longitudinais dos módulos experimentais

	L_{total}(mm)	L1 (mm)	I_1 (m/m)	L2(mm)	I_2 (m/m)	Ltotal(mm)
Módulo Intertravado	L = 37850	16350	0,005	21500	0,015	37850
Módulo CPA	L = 40000	18500	0,005	21500	0,015	40000

Tabela 2. Quadro resumo – Resultados obtidos pelos autores para porosidade μ = 25%

			BCP	**CPA**
	Precipitação (mm)	**H=Espessura do reservatório (mm)**	**H' = Espessura média do reservatório (mm)**	**H' = Espessura média do reservatório (mm)**
t(min)	**T= 10 anos**			
10	24,40	97,61	**299,73**	**305,11**

Foi efetuado também, o dimensionamento geomecânico da estrutura que pode ser visto em Virgiliis (2009). No módulo revestido de BCP a camada de base foi especificada com brita graduada simples, faixa B da DERSA, sub-base de macadame hidráulico - pedra 3 e pó de pedra como mostra a Figura 3. No módulo revestido de concreto asfáltico poroso (CPA), para as camadas de base e sub-base foram especificados respectivamente, macadame betuminoso, macadame hidráulico – pedra 3 e pó de pedra (Figura 4).

A seção transversal adotada para cada um dos módulos atendeu aos dois critérios (hidráulico/estrutural), mas prevaleceu na execução, a maior espessura obtida, ou seja, neste caso a resultante do dimensionamento hidrológico/hidráulico. As seções resultantes podem ser vistas na seqüência.

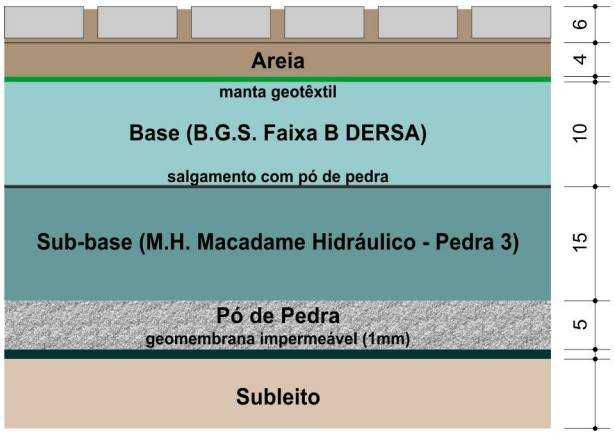


Figura 3. Perfil da área revestida com Blocos Intertravados de Concreto. Adaptado de Virgiliis (2009)

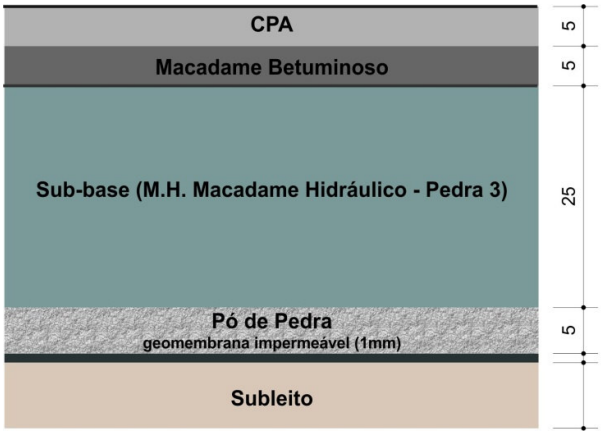


Figura 4. Perfil da área revestida com Concreto Asfáltico Poroso tipo CPA. Adaptado de Virgiliis (2009)

2.3 O monitoramento do modelo físico

A instrumentação dos dois módulos foi executada de maneira análoga, a partir de uma estação pluviométrica instalada no canteiro central alimentada por meio de energia solar e sua remota por meio de bateria.

Em cada módulo foi instalada uma caixa para coleta do escoamento subsuperficial e uma boca de lobo para coleta do escoamento superficial, ambas dotadas de vertedouros triangulares, dimensionados a partir da equação proposta por Kindsvater e Carter apud Lencastre (1983).

Foram também instalados sensores de nível ultrassônicos de alta performance em cada uma das caixas como se vê na Figura 5 e na Figura 6. Esses sensores possuem um range de 4 m, que representa a extensão da medida possível do sensor, nesse caso igual à no máximo 1,50m. A precisão é de ± 0,2 % da distância medida somada a 0,05 % do range, sob circunstâncias ótimas de reflexão e temperatura do transdutor estável. A resolução que depende da distância a ser medida, que nesse caso é menor que 2 m, é de 1 mm.

A função desses sensores é registrar a altura da lâmina d'água sobre o vertedouro e assim possibilitar o cálculo da vazão efluente.

Os dados são transmitidos via estação de coleta de dados com comunicação via telefonia celular e recuperados on line via internet em intervalos de dez minutos.

A partir da instrumentação (Figura 7) foram obtidos dados relativos à precipitação, e lâmina d'água formada sobre os vertedouros instalados nas quatro caixas projetadas no estacionamento.



Figura 5 - Instrumentação instalada no módulo de BCP.



Figura 6 -- Instrumentação instalada no módulo de CPA. Fonte: Acervo de Liliane L. C. Alves Pinto

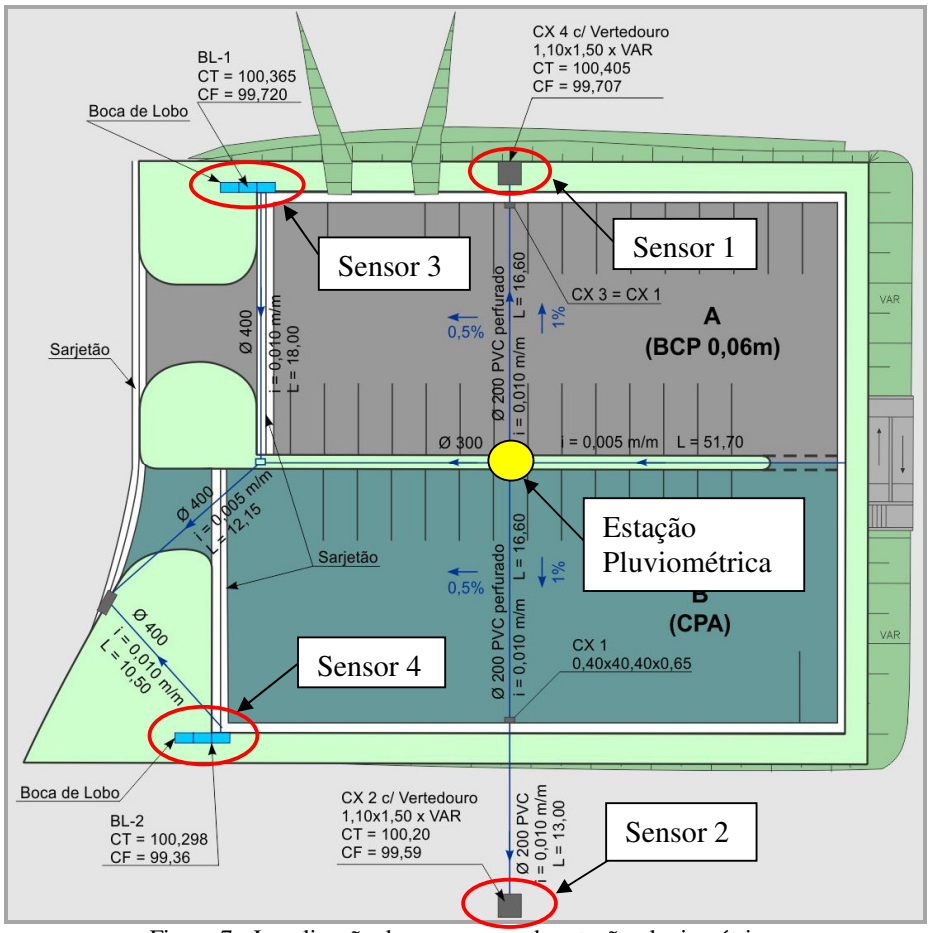


Figura 7 - Localização dos sensores e da estação pluviométrica.

Em virtude do painel da estação remota instalada para coleta de dados só possuir quatro canais, não foi possível a coleta simultânea dos dados superficiais, ou seja, provenientes de escoamento superficial do módulo de BCP e do módulo de CPA. Diante dessa dificuldade optou-se por monitorar a precipitação, o escoamento subsuperficial em ambos os módulos e o escoamento superficial em apenas um dos módulos, por vez. Essa sistemática seguiu a seguinte cronologia:

- módulo de **BCP**:
  - de 19 de janeiro a 07 de fevereiro e;
  - de 23 de março a 12 de abril.
- módulo de **CPA**:
  - de 8 de fevereiro a 22 de março e;
  - a partir de 13 de abril.

Foram coletados e armazenados os dados referentes a 23 eventos ocorridos no período do monitoramento. A partir da análise desses dados foram selecionados os eventos cuja precipitação acumulada ultrapassou 10 mm e a duração 30 minutos. Na Tabela 3 pode-se ver os dados referentes a precipitação, duração e período de retorno associado a cada um dos 16 eventos selecionados.

Tabela 3 - Resumo dos eventos selecionados para análise.

Item	Módulo Monitorado	Evento	Precipitação (mm)	Duração do Evento		Duração do Evento (horas)	TR IDF* (anos)
				Início	Fim		
1	BCP	1/2/2010	23,60	18:00	20:00	02:00	1,02
2	BCP	2/2/2010	16,60	17:30	20:50	03:20	< 1
3	BCP	4/2/2010	42,60	15:40	17:50	02:10	1,60
4	BCP	6/2/2010	2,80	17:30	18:20	00:50	< 1
5	CPA	25/2/2010	25,20	03:00	05:50	02:50	1,02
6	CPA	25/2/2010	1,80	06:10	07:30	01:20	< 1
7	CPA	25/2/2010	8,40	08:40	10:00	01:20	< 1
	CPA	25/2/2010	35,40			07:00	1,12
8	CPA	6/3/2010	31,20	07:00	13:50	06:50	1,05
9	CPA	14/3/2010	4,00	12:50	13:10	00:30	< 1
10	CPA	14/3/2010	10,40	17:40	19:00	01:20	< 1
11	CPA	14/3/2010	2,00	21:30	22:30	01:00	< 1
	CPA	14/3/2010	16,40			9:40	< 1
12	CPA	15/3/2010	2,80	03:40	06:20	02:40	< 1
	CPA	14 a 15/3/2010	20,00	12:40	08:50	20:10	< 1
13	BCP	25/3/2010	73,40	14:50	17:00	02:10	10
14	BCP	6/4/2010	18,80	09:10	17:10	01:10	< 1
15	CPA	23/4/2010	17,20	15:40	19:50	04:10	< 1
16	CPA	8/5/2010	21,40	17:20	21:40	4:20	< 1

* IDF (Martinez e Magni, 1999) desenvolvida para a cidade de São Paulo a partir de dados do posto IAG/USP-E3-035.

A correlação entre a precipitação e o período de retorno foi realizada inicialmente pela equação de chuvas descrita anteriormente.

2.4 O modelo matemático e a validação do modelo físico

Para a avaliação do desempenho potencial dos pavimentos permeáveis instalados experimentalmente foi desenvolvido um modelo matemático para simulação das duas fases distintas do processo: escoamento superficial direto (ESD), infiltração no meio poroso e escoamento através da base porosa (ESS), tanto para o modulo revestido de concreto asfáltico como para o revestido com blocos pré-moldados de concreto.

O modelo concebido é análogo ao modelo de separação proposto pelo Soil Conservation Service em 1972, hoje Natural Resources Conservation Service (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, isto é, utiliza-se do mesmo conceito de separação entre o total precipitado e o infiltrado, considerando-se uma parcela de perda. Como no modelo original do SCS, tanto o parâmetro de infiltração como a parcela de perda foram aferidos a partir das observações experimentais realizadas com o modelo físico, com o auxílio de rotinas construídas em planilha eletrônica.

A partir da mesma equação proposta pelo SCS, com o auxilio de um “Número de curva (CN)” determinado experimentalmente para cada cobertura específica, o modelo permite a separação do ESD e do volume infiltrado (ESS). A parcela superficial é transformada em escoamento através do hidrograma unitário e a parcela infiltrada é tratada novamente por um processo que separará a perda e o escoamento através do meio poroso de base, novamente transformado a partir de um hidrograma unitário.

O modelo desenvolvido teve o CN e o tempo de concentração ajustados para as duas fases (ESD e ESS) a partir dos eventos observados, com o uso da técnica de minimização dos erros quadráticos, de forma iterativa. Posteriormente, foi efetuada a somatória dos hidrogramas de ESD e de escoamento subsuperficial (ESS) e comparado ao hidrograma potencial, para obtenção da porcentagem de amortecimento do evento total. Como hidrograma potencial entende-se aquele que ocorreria em um pavimento convencional, cujo coeficiente de escoamento superficial é igual a 1. Na Figura 8 apresenta-se o esquema descrito para facilitar o entendimento dos procedimentos empregados nas duas fases.

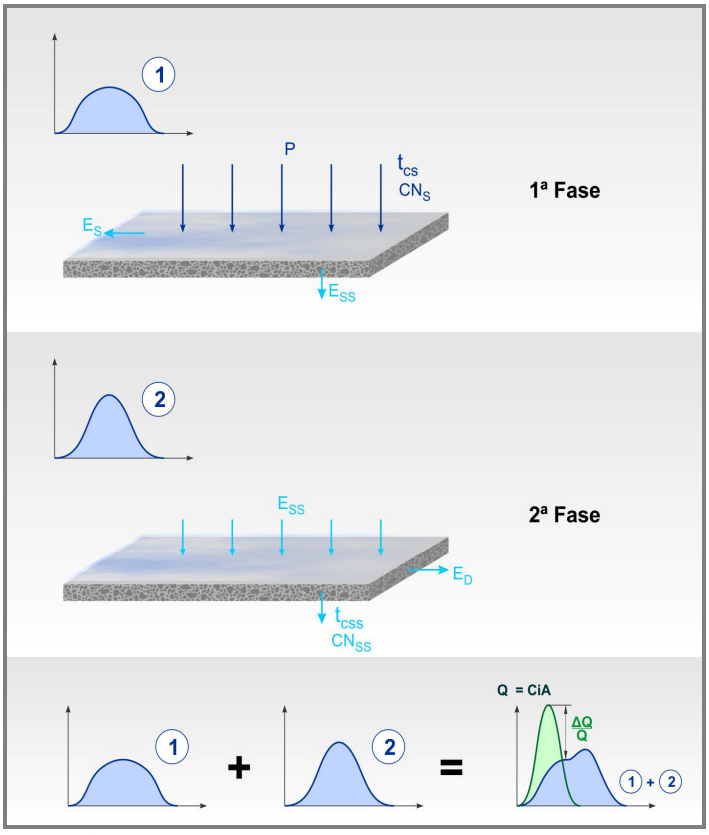


Figura 8 - Esquema de cálculo do modelo desenvolvido.

Portanto, a validação do modelo foi realizada a partir dos eventos observados e registrados nos sensores de monitoramento.

No módulo de CPA para modelação dos eventos observados não houve a 1ª fase, pois o volume de ESD registrado nos sensores foi praticamente igual a zero.

O hidrograma final em cada fase foi obtido pela composição linear dos diversos hidrogramas defasados.

Para possibilitar a análise de desempenho dos pavimentos na ocorrência de precipitações de outras magnitudes foram simulados eventos hipotéticos para durações de 0,17h, 0,5h, 1h, 4h, 6h, 12h e 24h e períodos de retorno de 1 ano, 10, 25, 50, 100 e 200 anos gerados a partir da equação de chuvas da cidade de São Paulo.

A desagregação da chuva foi realizada pelo método dos blocos alternados e as simulações realizadas considerando-se os resultados médios de t_{cs} e t_{css}, CN_S e CN_{SS} obtidos nas aferições dos eventos observados constantes na Tabela 4.

Tabela 4 - SUMÁRIO DOS PARÂMETROS DE MODELAÇÃO

Sumário dos parâmetros utilizados na modelação modeling				
Módulo	Fase	tc (h)	CN_i	CN_f
BCP	1	0,24	86,17	86,43
BCP	2	2,03	81,30	82,38
CPA	2	0,79	97,00	97,61

Foram simulados eventos para períodos de retorno de 100 e 200 anos na tentativa de envolver várias precipitações com durações prolongadas e talvez, retratar um possível seqüenciamento e o desempenho do pavimento permeável. Porém não garante que o desempenho será o mesmo em caso de seqüenciamento de chuvas muito intensas.

3. **RESULTADOS**

O desempenho dos pavimentos permeáveis implantados no CTH/USP foi avaliado a partir da porcentagem de amortecimento promovida no sistema de drenagem. Considerou-se amortecimento a parcela de vazão que não foi lançada no sistema de drenagem adjacente e ficou retida nos reservatórios, formados pela base porosa da pavimentação convencional, durante o evento de chuva. O cálculo da porcentagem de amortecimento foi realizado considerando-se a ***relação entre o pico do hidrograma de saída e o pico do hidrograma potencial***, ou seja, aquele que ocorreria em um pavimento convencional, cujo coeficiente de escoamento superficial é igual a 1. A vazão potencial foi calculada por bloco de chuva em cada intervalo de tempo. A relação considerada foi:

$$\%\, Q_{lançada\ sist.drenagem} = \frac{Q_{efl}}{Q_{pot}} \qquad (3)$$

Na qual,

Q_{efl}= vazão obtida no modelo matemático (l/s)

Q_{pot}= vazão potencial (l/s)

Sendo,

$$Q_{pot} = 166{,}67\ CiA_c \quad (4)$$

Na qual,

Q_{pot}= vazão potencial (l/s)

C= Coeficiente de escoamento superficial ou coeficiente corretivo

i= Intensidade da chuva (mm/min)

A_c= Área de contribuição (ha)

$$\%\ amortecimento = \left(1 - \frac{Q_{efl}}{Q_{pot}}\right) * 100 \quad (5)$$

A título de ilustração a Figura 9 apresenta os hidrogramas resultantes do evento de 6/3/2010 no módulo de CPA.

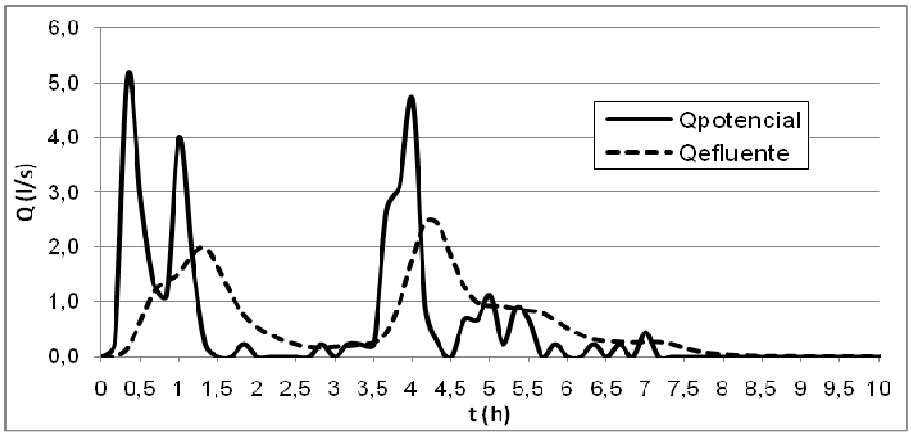


Figura 9 – Vazão potencial x Vazão efluente do evento de 6/3/2010 registrada no módulo de CPA

- **<u>Módulo de BCP</u>**

Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 5, na Tabela 6 e na Figura 10. Analisando-se esses resultados pode-se concluir que no BCP a medida em que a *duração da chuva e o período de retorno aumentam*, a capacidade de *amortecimento* da estrutura *diminui.* Pode-se perceber que para chuvas de menor intensidade o desempenho é melhor. Entretanto, para chuvas de até 1 hora de duração, ou seja, eventos freqüentes, para períodos de retorno que variam de 1 a 200 anos, a porcentagem de amortecimento se mantém na faixa de 50% a 85%, portanto, bastante eficiente. Para durações entre 4 e 24 horas essa faixa está entre 30% e 79% que corresponde a valores um pouco menores, entretanto, ainda com boa eficiência da estrutura, apresentando valores médios da ordem

de 43% para período de retorno de 10 anos. O gráfico da Figura 10 apresenta uma inflexão na faixa entre 1 e 10 anos de período de retorno da onde se pode afirmar que a estrutura projetada no módulo de BCP é bastante eficiente para essas chuvas, independente de sua duração resultando em valores na faixa de 40 a 87% de eficiência.

Tabela 5 - Relação %Amortecimento x TR x Duração da Chuva dos Eventos Observados no BCP

		% Amortecimento BCP		
		Duração (h)		
Evento	**TR (anos)**	**2**	**2,17**	**8**
6/4/2010	< 1			94,23
1/2/2010	1,02	83,46		
4/2/2010	1,60		67,88	
25/3/2010	10		28,90	

Tabela 6 – Relação %Amortecimento x TR x Duração da Chuva para o BCP

	% Amortecimento						
	Duração (h)						
TR (anos)	**0,17**	**0,5**	**1**	**4**	**6**	**12**	**24**
1,05		**87,38**	**85,11**	**79,52**	**77,10**	**77,39**	**76,55**
10	**84,51**	**63,80**	**60,57**	**47,70**	**45,24**	**41,93**	**39,26**
25		60,11	57,04	42,65	40,33	37,22	34,75
50		57,82	54,27	39,65	37,44	34,49	32,18
100		55,85	51,32	37,14	35,04	32,26	30,12
200		54,13	48,72	35,02	33,03	30,41	28,43

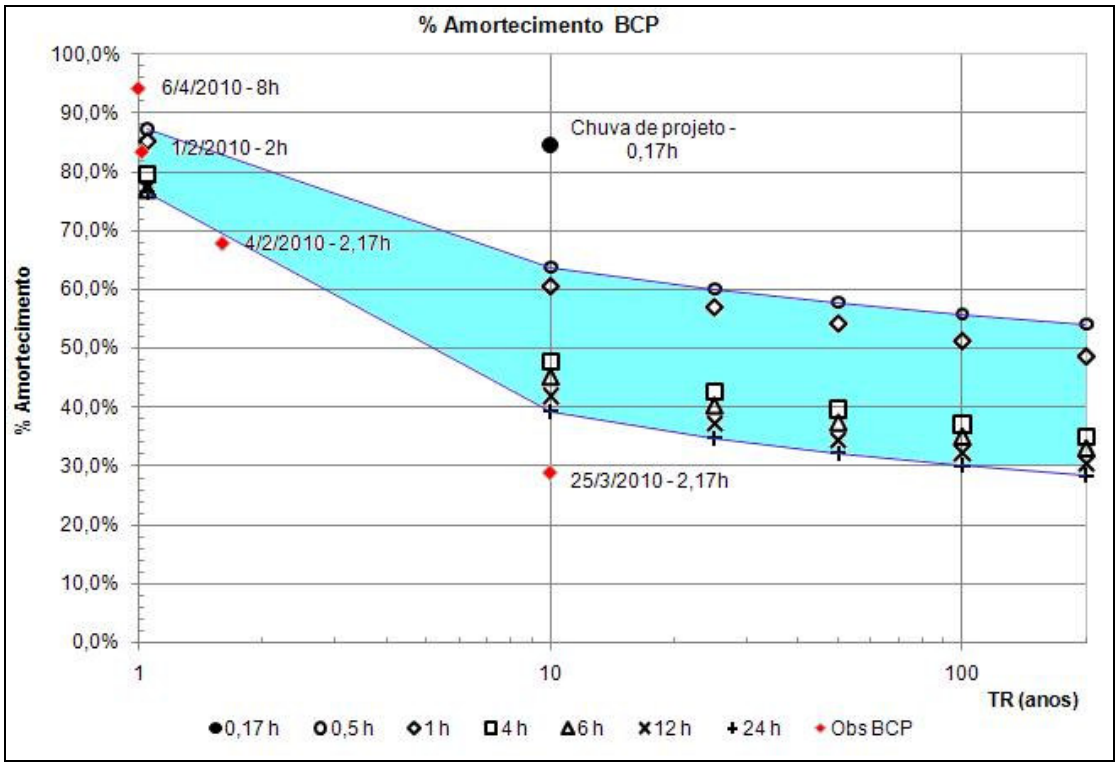


Figura 10 – Desempenho do módulo de BCP para chuvas de diversas durações e TR's.

Por ocasião de uma pane no pluviômetro houve eventos anteriores a 6/4/2010 que não foram registrados. Os resultados obtidos no evento de 6/4/2010, cuja duração foi de 8 horas e a eficiência de 94%, não foram considerados na calibração do modelo matemático e constam na Figura 10 apenas para ilustração, pois deveriam estar na faixa dos 77%. O evento de 25/3/2010 quando choveu 73,40 mm em 2h e 10min também apresentou valores abaixo da média, 28,90%. Provavelmente, os sensores não registraram os níveis corretamente. Os demais eventos estão dentro da faixa encontrada nos estudos.

- **Módulo de CPA**

Como se vê na **Tabela 8**, no modulo de CPA a porcentagem de amortecimento se mantém na faixa entre 56% e 85%, quando analisados todos os eventos.

Analisando-se os resultados compreendidos entre 1h e 24 horas de duração percebe-se que o limite superior da faixa cai, ficando entre 56% e 68%.

O que se constatou com as pesquisas é que a eficiência nos eventos de curta duração é muito significativa, com amortecimento da vazão afluente da ordem de 80% em relação à chuva total podendo chegar a 95% (Tabela 8) em chuvas com duração de 10 minutos e período de retorno de 10 anos, que foi a condição considerada nesta pesquisa.

Tabela 7 - Relação %Amortecimento x TR x Duração da Chuva dos Eventos Observados no CPA

	% Amortecimento CPA				
	Duração (h)				
TR (anos)	**4,17**	**4,33**	**6,83**	**7**	**9,67**
1	69,47	63,84			70,83
1,05			52,31		
1,12				74,45	
Evento	23/4/2010	8/5/2010	6/3/2010	25/2/2010	14/3/2010

Tabela 8 - Relação %Amortecimento x TR x Duração da Chuva para o CPA

	% Amortecimento						
	Duração (h)						
TR (anos)	**0,17**	**0,5**	**1**	**4**	**6**	**12**	**24**
1,05		84,90	68,48	64,82	64,36	63,84	63,51
10	95,75	77,01	60,63	57,89	57,49	57,11	56,88
25		75,90	59,78	57,26	56,92	56,62	56,44
50		75,22	59,29	56,91	56,61	56,36	56,21
100		74,64	58,87	56,64	56,38	56,15	56,03
200		74,13	58,52	56,42	56,18	55,99	55,88

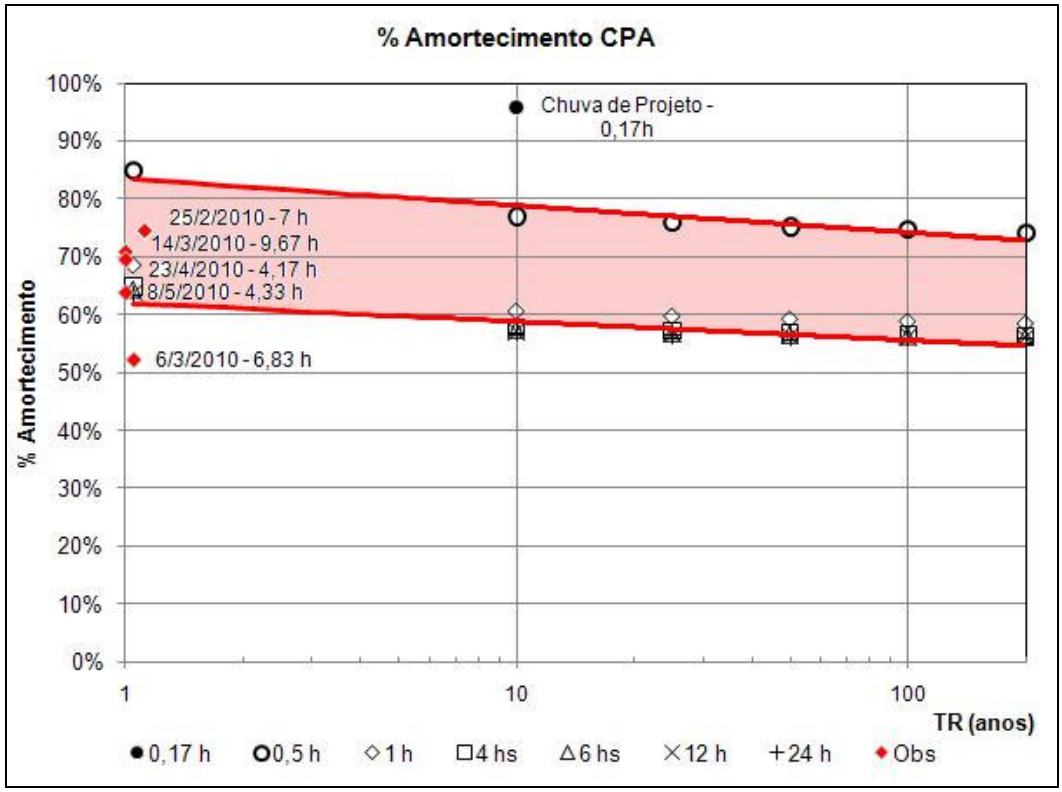


Figura 11 - Amortecimento promovido pelo módulo de CPA para chuvas de diversas durações

O que se percebeu ao longo dos estudos é que o BCP se mostrou muito eficiente para chuvas freqüentes, ou seja, para chuvas com períodos de retorno em torno de 1 ano, independente de sua duração e o CPA apresentou maior eficiência para chuvas compreendidas no intervalo entre 10 e 200 anos de período de retorno. Com relação ao CPA pode-se afirmar que isso ocorre porque nos eventos com períodos de retorno entre 10 e 200 anos, uma parcela do escoamento fica retida no reservatório. Por outro lado, nos eventos curtos, o despejo no sistema de drenagem é muito rápido.

Pode-se observar na Figura 10 e na Figura 11 que em ambas foram determinadas curvas envoltórias. Estas curvas representam as porcentagens de amortecimento mínimas e máximas encontradas em função do período de retorno. Portanto, o desempenho/eficiência de cada módulo está contido nas curvas envoltórias superior e inferior. O desempenho encontrado nesta pesquisa está na faixa entre 56% e 63% (inferior) e entre 74% e 85% (superior) para o CPA, e entre 28% e 76% (inferior) e 54% e 84% (superior) para o BCP.

Salienta-se, que estas conclusões estão relacionadas às características físicas e aos materiais empregados nos dois protótipos estudados**.**

4. CONCLUSÕES

Com relação ao desempenho dos pavimentos permeáveis em relação à porcentagem de amortecimento promovida no sistema de drenagem estes se mostraram dispositivos muito eficientes.

Os resultados dos ensaios do protótipo utilizando revestimento de BCP permitem concluir que para chuvas de até 1 hora de duração e períodos de retorno que variam de 1 a 200 anos, a porcentagem de amortecimento se mantém na faixa de 50% a 85%. Para durações entre 4 e 24 horas este amortecimento fica entre 30% e 79%, valores estes inferiores, mas que indicam boa eficiência da estrutura. Para períodos de retorno de 10 anos, valor usual admitido em drenagem urbana, a estrutura com revestimento de BCP proporciona amortecimento da ordem de 40%, e o mínimo obtido nas simulações dos eventos de diferentes combinações de duração/recorrência foi de **28%.**

O módulo com revestimento de asfalto poroso (CPA) apresenta amortecimento na faixa entre 56% e 85%, quando considerados todos os eventos simulados. Destacando-se os resultados compreendidos entre as durações 1h e 24h, o limite superior da faixa reduz-se, permanecendo a faixa entre 56% e 68%. O amortecimento mínimo encontrado para essa estrutura nos eventos simulados foi de **56%.**

Comparando-se os resultados dos dois modelos estudados, verifica-se que o revestimento asfáltico permeável tem desempenho melhor em eventos com período de retorno entre 10 e 200 anos. Nesse caso, a eficiência é da ordem de 56% (24h) a 60% (1h), chegando até 77% para eventos com 0,5h de duração e 95% em eventos com 10 minutos de duração. Para a mesma faixa de recorrência, o módulo com revestimento de concreto permeável tem desempenho de 28% (24h) a 64% (0,5h), portanto, com desempenho 17% inferior ao asfalto (CPA) em eventos curtos e 50% em eventos com 24h de duração.

Este artigo intenciona promover a divulgação de uma técnica compensatória que junto a outros dispositivos de drenagem convencional pode mitigar efeitos da impermeabilização do solo urbano.

BIBLIOGRAFIA

American Society Of Civil Engineers. *Design and construction of urban stormwater management systems.* New York: ASCE, 1992. 724 p.

American Society Of Civil Engineers. *Urban runoff quality - impact and quality enhancement technology.* New Hampshire: ASCE, 1986. p. 270-323.

Associação Brasileira De Cimento Portland. *Banco de obras - Pavimentos intertravados*. 2004. 1 DVD-ROM.

Azzout, Y. et al. *Techniques alternatives en assainissement pluvial.* Paris: Technique et Documentation - Lavoisier, 1994. 372 p.
Baptista, M.; Nascimento, N.; Barraud, S. *Técnicas compensatórias em drenagem urbana.* Porto Alegre: ABRH, 2005. 266p.
Butler, D.; Davies, J. W. *Urban drainage*. Londres: Spon Press, 2004. 543 p.
Cedergren, H. R. *Drainage of highway and airfield pavement*. Robert E. Krieger Publishing Company, Inc.,FL, 1987.
Cedergren, H. R. *Seepage, drainage, and flow nets.* John Wiley & Sons, 1977. 534p.
Chow, V. T. *Handbook of applied hydrology*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1964.
Lencastre, A. *Hidráulica geral*. Lisboa: [s.n.], 1983. 654p
Martinez, F. J.; Magni, N. L. G. *Equações de Chuvas Intensas do Estado de São Paulo.* São Paulo: DAEE. 1999.
Roesner, L. A.; Urbonas, B.; Sonnen, M. B. *Design of urban runoff quality controls*. Missouri: American Society of Civil Engineers, 1988. 490p.
Tucci, C. E. M.; Porto, R. L. L.; Barros, M. T. *Drenagem urbana.* Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ABRH, 1995. 428p.
Urbonas, B. R.; Roesner, L. A. Hydrologic desing for urban drainage and flood control. In: Maidment, D. R. *Handbook of hydrology.* New York: McGraw-Hill, 1992. Cap.28.