

Sistemas construtivos Pavimentos Permeáveis

Conceitos e Requisitos para Pavimentos Intertravado Permeável

MSc. Mariana L. Marchioni e MSc. Cláudio Oliveira Silva
Associação Brasileira de Cimento Portland

1 INTRODUÇÃO

Nos pavimentos impermeáveis ou de baixa permeabilidade, rapidamente há formação de escoamento superficial de água devido à falta de permeabilidade.

Esta água superficial irá demandar os sistemas de microdrenagem durante a chuva, podendo vir a causar enchentes (*Figura 1*).



Figura 1 - Pavimento praticamente impermeável. Verifica-se a rápida formação de escoamento superficial da água.

Ao contrário, os pavimentos permeáveis (*Figura 2*) evitam este tipo de escoamento superficial, garantindo que praticamente 100% da água seja infiltrada através de sua estrutura, podendo esta infiltrar no solo ou ser transportada através de sistemas auxiliares de drenagem.



Figura 2 - Pavimento permeável. Não ocorre o escoamento superficial. Praticamente 100% da água infiltra. Pode-se adotar $runoff = 0,05$

A estrutura de um pavimento permeável deve ser dimensionada considerando-se a chuva da região, um determinado período de retorno, e de acordo com as características de permeabilidade e suporte do solo e ainda o considerando-se o nível do lençol freático.

Pavimentos permeáveis são definidos como aqueles que possuem espaços livres na sua estrutura por onde a água pode atravessar (*FERGUSON, 2005*).

O pavimento permeável apresenta seção típica de acordo com a *Figura 3*.

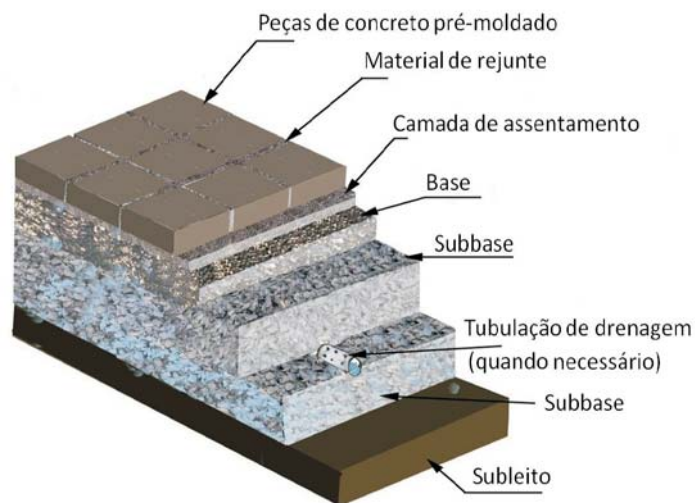


Figura 3 - Seção típica de pavimento intertravado permeável

O revestimento deve permitir a passagem rápida da água evitando assim que ela escoe superficialmente ou forme poças, garantindo que 100% da água superficial seja infiltrada através do pavimento em um intervalo de tempo compatível com a chuva local, resultando em um baixo coeficiente de escoamento superficial.

A água infiltrada fica então armazenada na estrutura do pavimento até escoar, funcionando como uma caixa de retardo.

A estrutura do pavimento deve ser dimensionada considerando-se a intensidade da chuva no local e as características do solo, além das condições de tráfego as quais o pavimento estará sujeito.

A principal característica desse sistema é a redução do escoamento superficial mantendo a área útil do pavimento.

2 COEFICIENTE DE ESCOAMENTO

O escoamento superficial¹ é o segmento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento da água na superfície da terra.

Tem origem, fundamentalmente, nas precipitações e constitui a mais importante das fases do ciclo hidrológico, uma vez que a maioria dos estudos está ligada ao aproveitamento da água superficial e à proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento (erosão do solo, inundação, etc). (VILELA; MATOS, 1975)

Para o dimensionamento de drenagem, o coeficiente de escoamento ou "runoff" é utilizado no cálculo da vazão máxima de contribuição de uma bacia através o método racional, de acordo com a equação:

$$Q = ciA$$

onde:

Q = vazão;

c = o coeficiente de escoamento;

i = intensidade da precipitação local

A = área do local.

Valores de referência do coeficiente de escoamento estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de "c" adotados pela Prefeitura Municipal de São Paulo (WILKEN, 1978)

Zonas		Coeficiente de escoamento
1	de edificação muito densa	0,70 a 0,95
2	de edificação não muito densa	0,60 a 0,70
3	de edificações com poucas superfícies livres	0,50 a 0,60
4	de edificações com muitas superfícies livres	0,25 a 0,50
5	de subúrbios com alguma edificação	0,10 a 0,25
6	de matas, parques e campos de esportes	0,05 a 0,20

¹ Coeficiente de Escoamento ou Deflúvio Superficial: Parte da água da chuva penetra no terreno, parte é retida pela vegetação, parte se acumula em lagos e barragens, e parte escoada pela superfície. Esta parcela que escoada pela superfície é chamada "deflúvio superficial" ou "run-off" em inglês.

O coeficiente de escoamento é a relação entre o volume total escoado pela secção de controle e o volume total precipitado.

Os valores de coeficiente de escoamento da Tabela 1 variam de 0,95 para uma área de edificação muito densa ou grandes áreas impermeabilizadas, como por exemplo, um estacionamento com pavimentação em asfalto. Este valor representa que até 95% da chuva vai gerar escoamento superficial.

No outro extremo, áreas pouco edificadas e arborizadas podem apresentar coeficientes de escoamento de 0,05, isto significa que apenas 5% da água vai gerar escoamento superficial, o restante vai ser infiltrado pelo solo ou ficar retido em depressões e na própria vegetação.

Os pavimentos permeáveis podem apresentar coeficientes de escoamento inferiores a 0,05 e ainda assim permitem a utilização do terreno como um pavimento. O objetivo de utilizar pavimentos permeáveis é justamente reduzir o coeficiente de escoamento, resultando assim uma área útil com um valor de "c" abaixo da faixa de regiões de matas, parques e campos de esporte.

Na prática, uma área com pavimentação permeável bem dimensionado acaba apresentando desempenho até mesmo superior a uma área com vegetação, caso esta já tenha parte do solo compactado.

Esta afirmação é corroborada por estudos que demonstram que nem sempre áreas livres de pavimentação apresentam coeficientes na faixa de 0,05 a 0,20, pois o solo compactado e a ausência de depressões e vegetação aumentam o volume de água escoado superficialmente. Isto pode ser observado em um estudo realizado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (ARAÚJO, 1999) onde foi simulada chuva em diferentes tipos de superfícies (Figura 4) e registrado o escoamento superficial.

A estrutura dos pavimentos com revestimentos de blocos vazados e o concreto poroso foram constituídas de agregado de granulometria aberta para permitir a infiltração total da água, caracterizando-se assim como pavimentos permeáveis. Na Tabela 2 estão descritos os coeficientes de escoamento obtidos neste ensaio através da relação entre a chuva total e o volume total de água escoado.

Tabela 2 - Coeficientes de escoamentos pelas superfícies (ARAÚJO, 1999)

Revestimento	Chuva total (mm)	Escoamento total (mm)	Coeficiente de escoamento
Solo compactado	18,66	12,32	0,66
Paralelepípedos	18,33	10,99	0,60
Bloco de concreto	19,33	15,00	0,78
Concreto	18,33	17,45	0,95
Blocos vazados	18,33	0,5	0,03
Concreto poroso	20,00	0,01	0,005

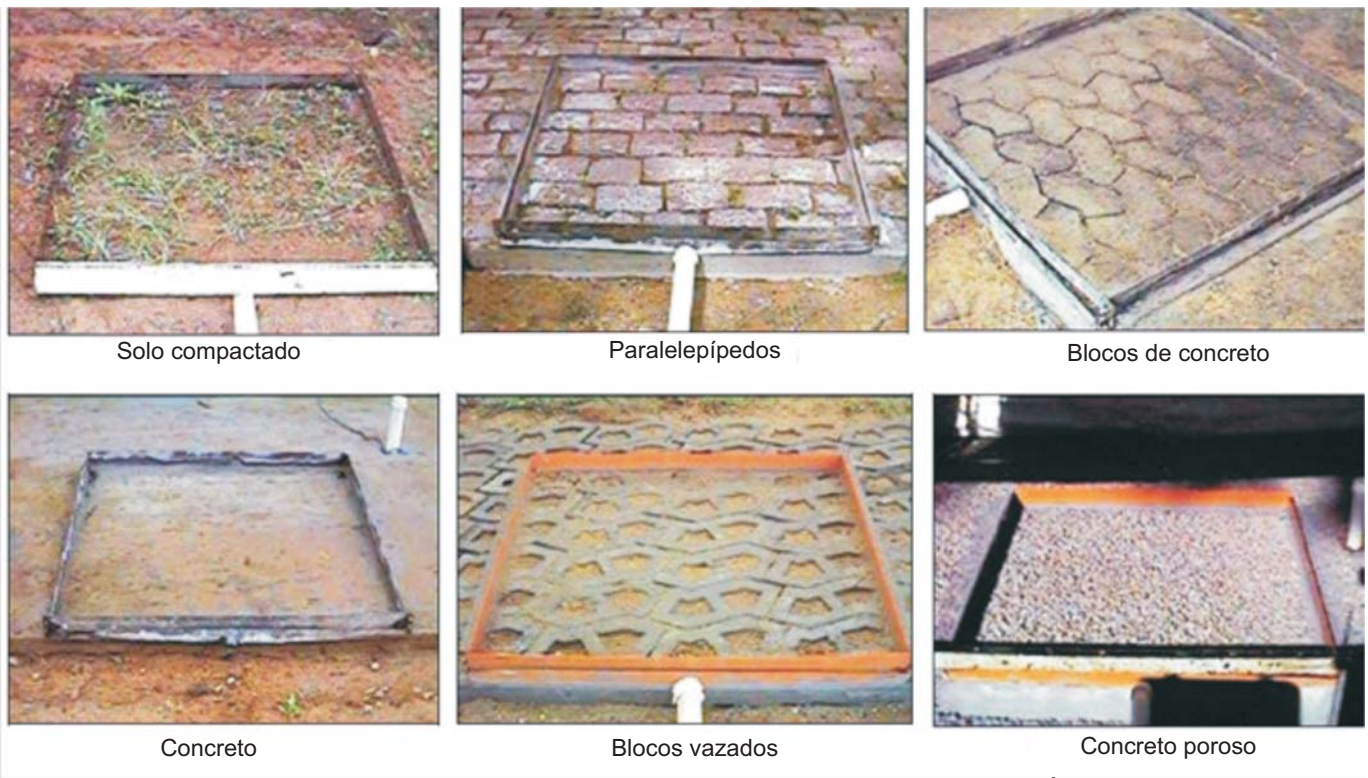


Figura 4 – Superfícies avaliadas em relação ao escoamento superficial (ARAÚJO, 1999).

Os resultados apresentados pelo solo compactado, ressaltam que considerar uma superfície não pavimentada como área permeável pode resultar em erro de projeto. O estudo demonstra que o importante não é apenas o tipo de revestimento adotado, mas as condições de infiltração do terreno.

Por outro lado, os pavimentos permeáveis (blocos vazados e concreto poroso) utilizados na pesquisa, apresentaram coeficiente de escoamento inferior a uma superfície não pavimentada (solo compactado). Isto reforça a contribuição positiva do uso desse sistema para redução do escoamento superficial.

Em áreas com pavimento permeável o projetista pode adotar valores de coeficiente de permeabilidade “**c**” de **0,05**, tornando possível reduzir a vazão de água gerada pelas áreas de contribuição consideradas permeáveis.

3 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

A forma correta de avaliar o desempenho de um pavimento permeável e garantir que ele irá contribuir com a diminuição do escoamento superficial de água, problema típico de áreas impermeáveis, é medindo a velocidade de infiltração de um volume conhecido de água, ou seja, determinando-se o seu coeficiente de permeabilidade.

O coeficiente de permeabilidade indica a velocidade de infiltração de água no solo, referida em m/s (PINTO, 2002).

Esta informação é importante para o dimensionamento do sistema na fase de projeto e também após a execução, como forma de acompanhar o desempenho do pavimento ao longo da sua vida útil.

Para determinar o coeficiente de permeabilidade de um solo em laboratório são utilizados permeômetros que podem ser de carga constante ou carga variável, dependendo do tipo de solo. O coeficiente de permeabilidade é então calculado através da Lei de Darcy.

Em uma superfície permeável o importante saber **em que taxa** a água passa e não em que quantidade!

Os valores de referência da estrutura do pavimento permeável se baseia nos estudos da permeabilidade natural dos solos. Na *Tabela 3* encontram-se os valores de referência para coeficientes de permeabilidade de solos (TERZAGUI; PECK, 1967). Nas faixas de permeabilidade alta e média a água irá infiltrar com facilidade, fora destas faixas o tempo de infiltração será bem maior e inadequado para superfícies consideradas permeáveis.

De maneira análoga, podemos utilizar o coeficiente de permeabilidade para avaliar os pavimentos permeáveis, considerando-se como valor mínimo de coeficiente de permeabilidade o valor de 10^{-5} m/s.

Tabela 3 - Valores típicos de coeficiente de permeabilidade de solos (TERZAGUI, PECK, 1967)

Tipo de solo	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)	Grau de permeabilidade
Brita	$> 10^{-3}$	Alta
Areia de brita, areia limpa, areia fina	10^{-3} a 10^{-5}	Média
Areia, areia suja e silte arenoso	10^{-5} a 10^{-7}	Baixa
Silte, silte argiloso	10^{-7} a 10^{-9}	Muito baixa
Argila	$< 10^{-9}$	Praticamente Impermeável

4 PAVIMENTO INTERTRAVADO PERMEÁVEL

Os pavimentos intertravados permeáveis podem ser construídos com três diferentes tipos de revestimentos, conforme ilustrado na Figura 5.



Figura 5 – Tipos de revestimento para pavimento intertravado permeável

- (A) peças de concreto com junta alargada.
 (B) peças de concreto com aberturas
 (C) peças de concreto poroso

5 REVESTIMENTO PERMEÁVEL UTILIZANDO PEÇAS DE CONCRETO CONVENCIONAL

No revestimento utilizando peças de concreto convencional, a infiltração pode se dar através das juntas (Figura 6) ou de aberturas específicas para esse fim (Figura 8).



Figura 6 - Pavimento intertravado permeável com juntas alargadas

A velocidade de infiltração de água depende da área total das aberturas e das características do material de rejuntamento, da camada de assentamento, da sub-base, da base e do próprio subleito ou do sistema de drenagem. As peças de concreto devem atender aos requisitos da norma ABNT NBR 9781.

5.1 PEÇAS DE CONCRETO COM JUNTAS ALARGADAS

Como a infiltração de água irá ocorrer através das juntas, o espaçamento entre as peças deve ter espessura adequada, para ao mesmo tempo permitir a infiltração de água e manter o intertravamento do pavimento.

As peças de concreto devem apresentar juntas alargadas com espaçadores incorporados às peças com espessura entre 6 mm e 10 mm. Isto irá proporcionar aberturas entre 5% e 15% da superfície, suficientes para que toda área do pavimento seja considerada permeável (Figura 7).



Figura 7 – Modelo ilustrativo de peça de concreto com juntas alargadas. Área de Infiltração = (Área externa - Área interna)/Área externa x 100

5.2 PEÇAS DE CONCRETO COM ABERTURAS ESPECÍFICAS PARA PASSAGEM DE ÁGUA

O arranjo geométrico deste tipo de peça deve atender ao mesmo requisito das peças com juntas alargadas, ou seja, deve apresentar entre 5% a 15% de áreas abertas.

A *Figura 8* ilustra alguns exemplos de formatos de peças com aberturas para passagem de água.



Figura 8 – Exemplos de peças com aberturas para passagem de água. Os formatos apresentados são apenas exemplos e podem estar protegidos por direito de patente.

5.3 MATERIAL DE ASSENTAMENTO E REJUNTAMENTO

O material de assentamento e de rejuntamento deve apresentar distribuição granulométrica que proporcione adequado teor de vazios, que resultará em um coeficiente de permeabilidade apropriado para o pavimento.

Vale ressaltar que o coeficiente de permeabilidade está intimamente ligado ao teor dos finos, portanto a limitação desse requisito deve ser observada no material utilizado. Recomenda-se a utilização de materiais com as características apresentadas na *Tabela 4*.

TABELA 4 - Características do agregado para assentamento e rejuntamento

Peneira com abertura de malha	Camada de assentamento	Material de rejunte
12,5 mm	0	
9,5 mm	0 a 15	0
4,75 mm	70 a 90	0 a 15
2,36 mm	90 a 100	60 a 90
1,16 mm	95 a 100	90 a 100
0,300 mm		95 a 100

Teor de finos: menor que 3% passante na peneira 0,075 mm

O material de rejuntamento deve preencher as juntas alargadas (5.1) ou os vazios entre peças (5.2) deixando-se um espaço de cerca de 10 mm em relação ao topo da peça sem preencher. Este espaço ajuda a eliminar a lâmina de água que se formaria na superfície e dificulta a saída do material de rejuntamento.

O atendimento da distribuição granulométrica recomendada na Tabela 4 possibilita, aos agregados utilizados nas camadas de assentamento e rejuntamento, atingir o coeficiente de permeabilidade da ordem de $3,5 \times 10^{-3}$ m/s, o que garante o perfeito funcionamento do sistema.

5.4 ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

A estimativa do coeficiente de permeabilidade do revestimento do pavimento é obtida através do produto entre o coeficiente de permeabilidade do agregado e a área de aberturas, aplicando-se uma redução de 80% de permeabilidade como fator de segurança devido à futura colmatação do sistema ao longo da sua vida útil. O valor resultante deve ser igual ou superior a 10^{-5} m/s para que o revestimento seja considerado permeável.

Exemplo:

Utilizando uma peça de concreto para pavimentação com dimensão de 10 x 20 cm e espaçador de 6 mm resulta em cerca de 8% de espaços abertos. Considerando a utilização de um agregado com coeficiente de permeabilidade de $3,5 \times 10^{-3}$ m/s (conforme Tabela 4) obtém-se o seguinte coeficiente de permeabilidade para a superfície:

$$k = 3,5 \times 10^{-3} \times 8\% = 2,80 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Considerando uma redução de 80% neste coeficiente em uma vida útil de 10 anos:

$$k = 2,80 \times 10^{-4} \times 20\% = 5,60 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

Ou seja, após 10 anos em condições normais de utilização, a superfície ainda irá atender o requisito de coeficiente de permeabilidade superior a 10^{-5} m/s. Depois deste período devem ser realizadas ações de manutenção para reabilitar a capacidade de infiltração de água do pavimento.

Considera-se que em 10 anos o revestimento sofrerá uma redução de 80% no seu coeficiente de permeabilidade, assim o coeficiente de permeabilidade inicial deve ser suficientemente alto para garantir o funcionamento hidráulico por toda a vida útil do pavimento.

6 REVESTIMENTO PERMEÁVEL EM CONCRETO POROSO

Nos revestimentos com peças de concreto poroso, a infiltração de água se dá pelos poros do concreto das peças (Figura 9).



Figura 9 – Pavimento Intertravado Permeável com peça de concreto poroso

A velocidade de infiltração de água depende da porosidade do concreto utilizado na peça e as características da camada de assentamento, da sub-base, da base e do próprio subleito ou do sistema de drenagem.

6.1 MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE

Para o pavimento intertravado com peças de concreto poroso é necessário caracterizar o coeficiente de permeabilidade das peças previamente à execução do pavimento.

O procedimento proposto pelo American Concrete Institute (ACI – 522R-06) utiliza um permeâmetro de carga variável (Figura 10), onde a amostra de concreto poroso é instalada.

Após a instalação, o circuito é aberto permitindo-se a passagem de água através amostra de concreto de poroso até o dreno, saturando-a e garantindo a retirada do ar.

Em seguida, o circuito é fechado através da válvula, mantendo-se o nível entre a superfície da amostra e o dreno do permeâmetro. Aplica-se uma coluna d'água de 290 mm e a válvula é novamente aberta, registrando-se o tempo para a coluna d'água descer até 70 mm da superfície da amostra.

O procedimento é repetido três vezes para cada corpo de prova e considera-se o tempo médio. O coeficiente de permeabilidade é determinado de acordo com a Lei de Darcy.

$$K = \frac{A_1 L}{A_2 t} \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)$$

onde:

- K = coeficiente de permeabilidade
- A_1 = área da sessão da amostra; m^2
- A_2 = área do tubo; m^2
- L = comprimento da amostra; m
- t = tempo; s
- h_1 = altura inicial (0,29 m)
- h_2 = altura final (0,07 m)

A norma ACI 522R-06 estabelece como valor mínimo para o concreto poroso coeficiente de permeabilidade (k) de $1,40 \cdot 10^{-3}$ m/s.

Valores inferiores à esta referência apresentam permeabilidade muito baixa, dificultando a infiltração de água e reduzindo a vida útil do pavimento.

Esta referência já considera um fator de segurança levando em conta que o concreto poroso irá colmatar ao longo do tempo.

O requisito de $k \geq 1,40 \times 10^{-3}$ já contempla um fator de segurança suficiente para garantir o funcionamento hidráulico por toda a vida útil do pavimento.

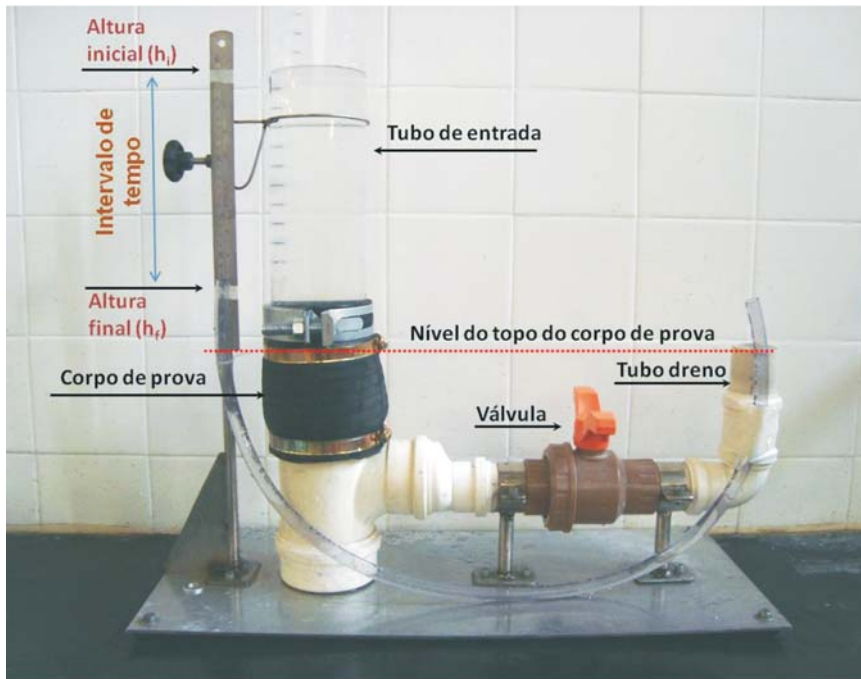


Figura 10 - Permeômetro de carga variável para determinação do coeficiente de permeabilidade do concreto poroso

7 MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE *IN SITU*

Para a avaliação do coeficiente de permeabilidade de pavimentos permeáveis já executados, recomenda-se o método de ensaio baseado na ASTM C 1701 – Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete, ou método de ensaio *in situ* para determinação de coeficiente de permeabilidade em concreto permeável.

O método utiliza um cilindro com diâmetro de 30 cm e altura mínima de 20 cm, que deve ser posicionado na superfície do pavimento permeável (Figura 11). As laterais do cilindro são vedadas com massa de calafetar de modo a evitar perda de água (SMITH, 2011; MARCHIONI; SILVA, 2011). O método pode ser utilizado para todos os tipos de pavimentos permeáveis já executados.



Figura 11 - Cilindro acrílico posicionado no pavimento permeável para realização do ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade.

Inicialmente o pavimento é pré-molhado com 3,6 L de água. Se o tempo da pré-molhagem for inferior a 30 s, utiliza-se 18 L de água no ensaio, ou novamente 3,6 L se o tempo de pré-molhagem for superior a 30 s.

Tanto na pré-molhagem como durante o ensaio, o volume de água deve ser adicionado ao cilindro mantendo-se um fluxo constante, para tanto, deve-se manter a altura de água dentro do cilindro entre 10 mm e 15 mm. O coeficiente de permeabilidade é obtido através da Lei de Darcy, segundo a equação:

$$I = \frac{K \cdot M}{D^2 \cdot t}$$

onde:

I = coeficiente de infiltração (mm/h);

M = massa de água infiltrada (kg);

D = diâmetro interno do cilindro (mm);

t = intervalo de tempo entre adição da água e seu desaparecimento da superfície;

K = constante: 4.583.666.000

O método também pode ser utilizado para aprovação do pavimento após sua execução e no monitoramento ao longo da utilização do pavimento, podendo ser utilizado para definir a necessidade de limpeza e manutenção do pavimento.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema de pavimentação permeável é uma solução simples e de ótimo custo x benefício para o combate de enchentes no manejo da microdrenagem urbana. Porém, alguns conceitos devem ser verificados para garantir que o sistema funcione corretamente e atenda as funções as quais foi concebido.

Dessa forma, para verificar se o pavimento é, efetivamente permeável deve-se determinar o coeficiente de permeabilidade do pavimento acabado. Valores de coeficiente de permeabilidade acima de 10^{-5} m/s atestam que o pavimento irá funcionar de forma adequada.

Para pavimentos permeáveis com juntas alargadas deve-se especificar largura de juntas com no mínimo 5% de área abertas em relação à área total do pavimento.

Os agregados utilizados no pavimento permeável devem respeitar as distribuições granulométricas indicadas para cada camada, sempre se considerando a presença de baixos teores de finos e distribuição granulométrica que proporcione um teor de vazios na ordem de 30%.

As peças de concreto poroso devem atender aos requisitos de resistência à compressão e de coeficiente de permeabilidade.

9 REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Pervious Concrete. ACI – 522R-06. Michigan, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete. ASTM 1701/C. PENNSYLVANIA, 2009.
- ARAÚJO, P. R., TUCCI, C. E. M., GOLDEFUM J. A. Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRG. Porto Alegre, 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Peças de concreto para pavimentação – Especificação. NBR 9781. Rio de Janeiro, 1987.
- FERGUSON, B. K. Porous Pavements. Integrative Studies in Water Management and Land Development. Florida, 2005.
- MARCHIONI, Mariana; SILVA, Cláudio Oliveira. Pavimento intertravado permeável – melhores práticas - ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. São Paulo, 2011.
- PINTO, C. Curso básico de mecânica dos solos. Oficina de textos. 2ª edição. São Paulo, 2002.
- SMITH, D. R. Permeable Interlocking Concrete Pavements. 4th edition. ICPI – Interlocking Concrete Pavement Institute. Washington D.C., 2011.
- TERZAGHI, K. and PECK, R. B. (1967). Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd edn.. John Wiley, New York, London, Sydney.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 245p

GLOSSÁRIO

- Permeável: que pode ser permeado. Permite a percolação (infiltração) de água.
- Percolação ou Infiltração : É o processo pelo qual a água penetra nas camadas superficiais do pavimento, se movendo para baixo através dos vazios da estrutura pela ação da gravidade, até atingir o solo ou uma camada impermeável, podendo alimentar um lençol d'água ou ser drenado.
- Drenagem: Remoção da água da estrutura do pavimento por meio de condutos.