

Study on the hydraulic conductivity by constant and falling head methods for pervious concrete

Estudo da condutividade hidráulica com carga constante e variável em concretos permeáveis



R. BATEZINI^a
rafaelbatezini@usp.br

J. T. BALBO^a
jotbalbo@usp.br

Abstract

The main goal of this paper is to show the analysis of the permeability characteristics of three different mixes of pervious concrete produced with the variation of the coarse aggregate size. Two different test methods were used to achieve the hydraulic conductivity of the samples: falling head and constant head permeability tests. Based on test results it is concluded that the pervious concrete mixes have shown to be good drainable materials. Besides, it was found that the permeability of the mixtures does not seem to depend on the size and gradation of the coarse aggregate.

Keywords: pervious concrete, permeameter, hydraulic conductivity, concrete pavements.

Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar os resultados de ensaios de permeabilidade realizados para três misturas de concretos permeáveis produzidos com diferentes granulometrias, a fim de determinar a variação do potencial permeável destas misturas considerando as diferentes porcentagens de agregados graúdos na sua composição. Para determinação do coeficiente de permeabilidade foram empregados dois métodos: ensaio de permeabilidade com carga variável e com carga constante. A partir da análise dos resultados obtidos, pôde-se observar que os materiais estudados apresentam muito boas características de drenabilidade e que a variação da granulometria em termos de agregados graúdos não é fator preponderante para a variação deste parâmetro..

Palavras-chave: concreto permeável, permeâmetro, condutividade hidráulica, pavimentos de concreto.

^a Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, SP, Brasil.

1. Introdução

Um dos principais impactos que o desenvolvimento urbano acelerado provoca nos processos hidrológicos está ligado ao crescimento de áreas com superfícies impermeáveis, que juntamente com a ocupação indevida das margens de rios e córregos, aumenta em grande escala a probabilidade de ocorrência de picos de cheias, agravando assim os problemas de enchentes dos rios e inundações nas cidades. Estas ocorrências são consequência direta da explosão demográfica aliada à falta de planejamento de uso e ocupação do solo urbano por parte das instituições governamentais.

Nos últimos anos, um conceito de controle hidrológico alternativo aos convencionais tem conquistado espaço no cenário da drenagem urbana brasileira. As *Best Management Practices* (BMPs) são técnicas que tem como propósito evitar a transferência dos problemas de montante para jusante por meio do controle do escoamento na bacia, mais próximo de sua fonte, e não no curso d'água. Este conceito foi desenvolvido nos Estados Unidos da América (EUA) pela *Environmental Protection Agency* (EPA) nos anos 80 e é constituído pelo planejamento do controle de águas pluviais em escala de bacia e uso de estruturas físicas para armazenamento e infiltração do escoamento (reservatórios, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis), na tentativa de compensar os efeitos da urbanização [1].

Além disso, os projetos realizados para implantação de viários, corredores e outras obras de infraestrutura nos grandes centros urbanos, necessitam considerar diversos requisitos técnicos e ambientais preconizados pelas agências de transporte bem como pelos órgãos ambientais. No que tange aos critérios ambientais, observa-se que cada vez mais existem normas que restringem a implantação de obras que impermeabilizem as áreas urbanas, sendo que para obtenção das licenças para implantação destas obras, normalmente solicita-se que a área permeável seja de no mínimo 30% em relação à área total do empreendimento. Nesse contexto, considera-se como solução a implantação de pavimentos permeáveis, que devem possuir características mecânicas e hidráulicas suficientes para suportar os carregamentos oriundos do tráfego, bem como permitir a percolação da água das intempéries pelo sua estrutura, reduzindo-se em quase 100% o escoamento superficial.

Pavimento permeável é uma estrutura que permite a passagem de água e ar através de suas camadas. É um dispositivo de infiltração que absorve parte ou a totalidade do escoamento por meio de uma superfície permeável para dentro de um reservatório de brita com distribuição granulométrica uniforme, construída sobre o subleito da área pavimentada. A água, quando captada pelo pavimento,

pode ser conduzida para um reservatório, e deste para um ponto de captação específico, ou simplesmente ser absorvida pelo subsolo, dependendo da sua capacidade permeável. A sub-base e a base dos pavimentos permeáveis, constituídas de agregados com pouca quantidade de finos, atuam como um recipiente de coleta d'água, permitindo que o líquido seja estocado nos vazios das camadas.

1.1 Justificativa

No contexto brasileiro são ainda poucas as pesquisas sobre a utilização do concreto permeável bem como o seu desempenho em longo prazo, sendo que o número de publicações encontradas sobre este tema é escasso. Considerando-se as vantagens ambientais e econômicas possíveis quando da utilização deste material como revestimento de pavimentos de tráfego leve e pesado frente aos demais materiais, percebe-se a importância de se realizar estudos mais detalhados sobre o assunto, entre os quais, a avaliação da condutividade hidráulica de concretos permeáveis. Este trabalho teve exatamente esse objetivo, apresentando os resultados de condutividade hidráulica obtidos por meio de ensaios de permeabilidade com carga variável e com carga constante, realizados em corpos de prova produzidos para três diferentes misturas de concretos permeáveis com a variação da granulometria dos agregados graúdos, focando na influência da mesma na permeabilidade do material.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Materiais

Para os estudos de caracterização hidráulica foram preparados corpos de prova cilíndricos de concreto permeável. As moldagens foram realizadas no laboratório da Holcim Brasil, em São Paulo. Os estudos laboratoriais referentes aos ensaios de permeabilidade foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos e no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, ambos do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP.

A dosagem de cada uma das misturas foi pré-definida a partir da revisão da literatura, de modo empírico, uma vez que não existe procedimento específico documentado para dosagem de concreto permeável. Assim, foram escolhidos traços de misturas já estudadas anteriormente no intuito de verificar a influência da granulometria dos agregados graúdos na variação da condutividade hidráulica entre estas misturas. Foram moldadas três diferentes misturas com proporções dos agregados conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Proporções de agregados utilizados nas moldagens

Misturas	% de material retido na peneira de abertura		
	9,5 mm	6,3 mm	4,75 mm
M1	0	100	0
M2	0	50	50
M3	30	40	30

Tabela 2 – Traços dos concretos

Materiais	Proporção
Material cimentício (kg/m ³)	374
Agregado (kg/m ³)	1.660
Relação a/c em massa	0,3
Relação cimento/agregado em massa	1:4,4

Figura 1 - Compactação das amostras



A faixa de variação do teor de cimento observada na pesquisa bibliográfica fora entre 340 e 400 kg/m³, sendo que para o presente estudo foi utilizado o consumo de cimento de 374 kg/m³. O teor de agregados utilizado para as três misturas foi de 1.660 kg/m³ o que representa uma proporção cimento/agregado de 1:4,4; a relação a/c foi fixada em 0,3, seguindo padrões de outros estudos. A composição utilizada para as moldagens está resumida na Tabela 2.

2.2 Procedimento de moldagem e cura

O procedimento de compactação para a moldagem das amostras cilíndricas (20 cm de altura e 10 cm de diâmetro) consistiu na aplicação de 15 golpes de haste de socamento por cada uma das três

camadas de igual espessura (Figura 1), com posterior vibração do molde por dez segundos em mesa vibratória (Figura 2). Após moldagem as amostras foram mantidas em câmara úmida com umidade relativa do ar constante de 98%, conforme NBR 5738 [2]. Todas as amostras permaneceram nos moldes pelo período de sete dias uma vez que, diferentemente do concreto convencional, as amostras de concreto permeável moldadas não apresentaram estrutura suficientemente estável para serem desmoldadas após 24 horas, conforme preconiza a norma.

2.3 Ensaios de permeabilidade

2.3.1 Permeômetro com carga variável

Para realização do ensaio com carga variável foi empregado um permeômetro construído artesanalmente no laboratório com essa finalidade. O equipamento é munido de um registro para fechamento da circulação de água bem como um nível externo para verificação da altura de coluna d'água (Figura 3). Foram ensaiados doze corpos de prova para cada mistura de concreto permeável no intuito de se obter um número de amostras suficiente para posterior realização da análise estatística dos resultados.

Para realização dos ensaios, 25 dias após as moldagens, as amostras foram envoltas em filme plástico com a finalidade de se evitar perda de água por sua superfície lateral. Além disso, foram confeccionados dois anéis de silicone para vedação da base e do topo das amostras, evitando-se vazamentos de água durante a execução o ensaio.

O procedimento de ensaio consistiu, inicialmente, em adicionar água pelo tubo de saída do permeômetro até as proximidades de seu nível máximo, que condiz com o nível do topo da amostra, garantindo-se que não houvesse presença de ar em sua estrutura interna. Após imersão completa da amostra, era fechado o registro existente no centro do permeômetro. Na sequência a água era adicionada ao tubo graduado até atingir uma altura de coluna d'água de 25 cm. Por fim, o registro era aberto e cronometrado o

Figura 2 - Procedimento de vibração das amostras



Figura 3 - Permeômetro com carga variável



Figura 4 – Permeômetro com carga constante



tempo necessário, em décimos de segundos, para a água atingir o nível de 5 cm. De posse dos tempos obtidos no ensaio, a determinação da condutividade hidráulica foi realizada pelo emprego da Equação (1).

$$k = \frac{aL}{At} \times \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

Na Equação (1) k é o coeficiente de permeabilidade (cm/s), a é a seção transversal do tubo (cm²), L é o comprimento da amostra cilíndrica (cm), At é a área de sua seção transversal (cm²), t é o tempo decorrido entre o escoamento de h_1 até h_2 (s), e h_1 e h_2 são os níveis inicial e final da água (cm).

2.3.2 Ensaio com carga constante

Em Mecânica dos Solos, considera-se que para materiais com elevada permeabilidade ($k > 10^{-3}$ cm/s), que é o caso do concreto permeável, deve-se empregar para determinação da condutividade hidráulica o ensaio de carga constante, onde a altura de coluna d'água não varia no decorrer do teste. Mesmo assim, todas as

pesquisas que apresentam ensaios de permeabilidade em concretos permeáveis utilizam a técnica de ensaio de carga variável, uma vez que, para fins práticos e de controle de obra, a utilização de ensaios de carga variável pode ser realizado de maneira muito simples em campo, facilitando a comparação entre os resultados de campo e laboratório, para controle de qualidade da execução do concreto.

No caso do ensaio com carga constante o equipamento é munido em sua parte inferior de um anel plástico onde o corpo de prova é posicionado (Figura 4). Com a finalidade de evitar perda de água pelas laterais das amostras, utiliza-se uma membrana flexível (encamisamento) posicionada internamente ao anel plástico. Estando a amostra posicionada no interior do anel, aplica-se pressão na membrana flexível deixando a amostra totalmente envolta pela membrana. O recipiente utilizado para produzir a pressão de água sobre o corpo de prova é munido de uma entrada e uma saída d'água, bem como por um ladrão para evitar transbordamento.

Para realização dos ensaios as amostras cilíndricas foram então cortadas em quatro partes, uma vez que a limitação de altura da amostra a ser ensaiada no equipamento disponível é de 5,5 cm,

Tabela 3 – Resultados no ensaio com carga variável (cm/s)

M1	M2	M3
0,58	0,50	0,59
0,51	0,59	0,71
0,51	0,59	0,78
0,52	0,68	0,66
0,51	0,60	0,67
0,62	0,73	0,72
0,47	0,62	0,77
0,62	0,72	0,66
0,62	0,68	0,75
0,56	0,64	0,75
0,64	0,64	0,71
0,62	0,59	0,66

Tabela 4 – Análise estatística básica dos resultados de condutividade hidráulica no ensaio com carga variável

Parâmetro	Condutividade hidráulica (cm/s)		
	M1	M2	M3
μ	0,565	0,630	0,703
σ	0,058	0,065	0,054
cv (%)	10,21	10,32	7,68
μ = média; σ = desvio padrão; cv = coeficiente de variação			

Tabela 5 – Resultados no ensaio com carga constante

Posição	Coeficiente de condutividade hidráulica (cm/s)		
	M1	M2	M3
Top	0,13	0,13	0,14
	0,14	0,13	0,14
Bottom	0,13	0,13	0,14
	0,14	0,11	0,14
	0,14	0,13	0,14
	0,15	0,14	0,14

sendo que as partes restantes da superfície e do fundo das amostras foram descartadas e os ensaios realizados somente com duas porções centrais (topo e fundo).

O controle da coluna d'água foi realizado nivelando-se a água no recipiente que, por sua vez, era calibrado pela vazão da água de entrada. Com a finalidade de manter um fluxo laminar de água, que varia em função da velocidade do líquido no conduto, foram realizadas diversas tentativas para encontrar a altura de coluna d'água ideal para o material estudado.

O ensaio consistiu em posicionar a amostra na parte inferior do permeâmetro aplicando-se pressão à membrana flexível para vedação completa de suas laterais. Em seguida liberou-se o fluxo para que todo o sistema ficasse preenchido com água. Com a finalidade de manter a altura de coluna d'água constante, a vazão foi aumentada até que o nível da água

Tabela 6 – Análise estatística básica dos resultados de condutividade hidráulica no ensaio com carga constante

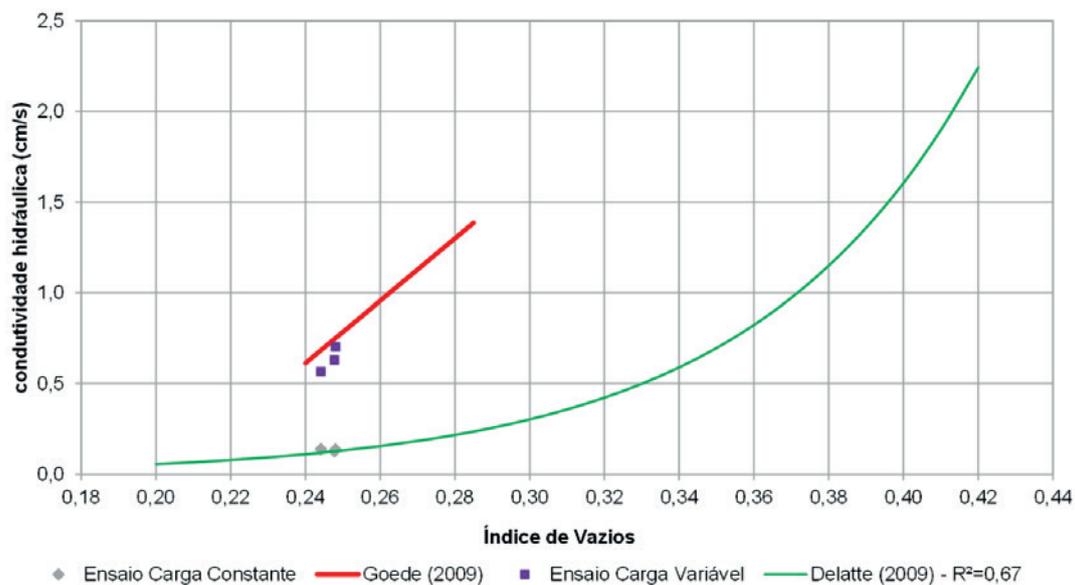
Parâmetro	Condutividade hidráulica (cm/s)		
	M1	M2	M3
μ	0,14	0,13	0,14
σ	0,008	0,009	0,002
cv (%)	5,66	6,80	1,50
μ = média; σ = desvio padrão; cv = coeficiente de variação			

se apresentasse constante. Em seguida, coletou-se a água de saída em um recipiente, cronometrando-se o tempo para coleta. Por fim, o recipiente de tara conhecida foi pesado para determinar o volume de água coletado. Foram realizados quatro ensaios por amostra, sendo que a condutividade hidráulica foi calculada pela média dos valores obtidos. De posse do volume e o tempo decorrido para coleta, foi possível determinar a condutividade hidráulica da amostra a partir da Equação (2) que se segue.

$$k = \frac{V.L}{h.A.t} \tag{2}$$

Na Equação (2) k é a condutividade hidráulica (cm/s), V é o volume de água coletado (cm³), L é o comprimento do corpo de prova

Figura 5 – Comparação da variação da condutividade hidráulica obtida pelos dois métodos em função do índice de vazios médio



(cm), h é a carga hidráulica (cm), A é a área da seção transversal da amostra (cm²) e t é o tempo decorrido para a coleta da água (s).

3. Resultados e sua discussão

Nas Tabelas 3 a 6 estão apresentando os resultados de condutividade hidráulica e a análise estatística dos dados. Observa-se que os valores de condutividade hidráulica médios foram semelhantes para todas as misturas em ambos os ensaios realizados, indicando que a variação do diâmetro máximo do agregado graúdo não gera diferenças significativas na capacidade de drenagem do material. Essa condição pode ser explicada em função dos índices de vazios característicos destas misturas, que também apresentaram pequena variação [3], sendo que o índice de vazios parece estar diretamente associado à capacidade permeável do concreto composto somente por agregados graúdos.

Com relação à análise estatística, observou-se que os coeficientes de variação são em geral baixos (inferiores a 11%). Nota-se que o ensaio de carga constante foi o que gerou resultados mais homogêneos, uma vez que os coeficientes de variação obtidos foram ainda mais baixos, quando em comparação com os coeficientes de variação obtidos no ensaio de carga variável.

Dos ensaios de carga constante observa-se que os valores médios da condutividade hidráulica obtidos variam de 0,13 a 0,14 cm/s, aproximadamente. Estes valores estão dentro da faixa de valores obtidos pela grande maioria dos autores que determinaram esse parâmetro em amostras de concretos permeáveis, que apresentam valores variando entre 0,01 e 1,5 cm/s [4; 5].

Percebe-se também que existe uma diferença considerável quando são comparados os resultados médios obtidos por meio dos dois ensaios, sendo que os resultados obtidos com ensaio de carga variável foram sempre mais elevados do que aqueles obtidos com ensaio de carga constante. Isto pode ser atribuído à diferença de tecnologia entre os equipamentos. No ensaio de carga variável, a amostra foi envolta por filme plástico com a intenção de se reduzir ou limitar a passagem da água pelas laterais do corpo de prova. Porém, diferentemente do equipamento empregado para o ensaio com carga constante, não foi aplicada pressão externa no entorno da amostra no ensaio de carga variável, o que pode ter ocasionado uma considerável perda de água pelas laterais do corpo de prova, resultado em maiores valores de condutividade hidráulica. Na Figura 5 é apresentada a variação das condutividades hidráulicas obtidas pelos dois métodos em função da variação do índice de vazios observados na presente pesquisa, em comparação aos resultados de outros autores. Nota-se que os valores de condutividade hidráulica obtidos no presente estudo são muito semelhantes àqueles obtidos por [6] no caso do ensaio com carga constante e índice de vazios na ordem de 0,25, aproximadamente. Já [7] obteve valores de condutividade hidráulica aproximadamente cinco vezes maiores, que se equiparam aos resultados obtidos por meio do ensaio com carga variável, para índice de vazios igual a 0,25, aproximadamente. Cabe ressaltar que ambos os autores utilizaram ensaio com carga variável na obtenção de seus respectivos resultados.

4. Conclusões

Foram apresentados resultados de ensaios para determinação de

coeficiente de condutividade hidráulica de concretos permeáveis empregando-se os ensaios com carga variável e com carga constante. Os resultados permitiram observar que:

- A composição granulométrica das misturas com variação do diâmetro dos agregados graúdos parece não ter efeito significativo nos resultados de condutividade hidráulica dos concretos permeáveis, uma vez que os valores foram muito próximos para as três misturas;
- Observou-se que os coeficientes de variação dos resultados foram pequenos (inferiores a 11%). Nota-se também que os resultados obtidos no ensaio com carga constante se mostraram menos dispersos do que aqueles obtidos no ensaio com carga variável;
- Tais diferenças entre dispersões nos resultados de condutividade hidráulica devem estar associadas à etapa de confinamento lateral das amostras, sendo que este adequado confinamento pode não ter sido garantido no ensaio com carga variável devido às limitações do equipamento montado em laboratório;
- Os coeficientes de condutividade hidráulica obtidos são semelhantes aos relatados por outros autores, sendo que este parâmetro é fortemente relacionado ao índice de vazios das misturas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa de mestrado concedida, à Holcim Brasil pelo apoio na produção das amostras e aos Laboratórios de Tecnologia de Pavimentação e de Mecânica dos Pavimentos da EPUSP.

6. Referências bibliográficas

- [1] McCUEN, R. H. *Hydrologic Analysis and Design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 1989.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Molding and cure of cylindrical and prismatic concrete samples. (In Portuguese) Rio de Janeiro, 1994.
- [3] BATEZINI, R. Preliminary study of pervious concrete as pavement surface layer for light vehicles parking areas. (In Portuguese) Master thesis, Department of Transportation Engineering, University of São Paulo, 2013.
- [4] SCHAEFER, V.; WANG, K.; SULEIMAN, M.; KEVERN, J. *Mix Design Development for Pervious Concrete in Cold Weather Climates*. Final Report, Iowa State University, 2006.
- [5] MONTES, F.; HASELBACH, L. *Measuring Hydraulic Conductivity in Pervious Concrete*. Environmental Engineering Science V. 23, p. 960-969, 2006.
- [6] DELLATE, N.; MRKAJIC, A.; MILLER, D. I. *Field and Laboratory Evaluation of Pervious Concrete Pavements*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. v. 2113, p. 132 – 139, 2009.
- [7] GOEDE, W. G. *Pervious Concrete: Investigation into Structural Performance and Evaluation of the Applicability of Existing Thickness Design Methods*. Master thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, 2009.