

INFLUÊNCIA DA POROSIDADE NO TRANSPORTE DE ÁGUA EM CONCRETOS

SATO, Neide M. N.(1); AGOPYAN, V. (2)

(1) Física, Doutora em Engenharia, Consultora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A e Pesquisadora associada do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP - Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, nº 271 – São Paulo - CEP 05508-900. E-mail: neide@pcc.usp.br

(2) Engenheiro, PhD em Engenharia, Prof. Titular do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP - Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, nº 271 – São Paulo - CEP 05508-900. E-mail: agopyan@pcc.usp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de uma pesquisa desenvolvida para estudar a influência das dimensões e do volume total de poros no transporte de água em concretos.

O estudo foi conduzido com concretos com dois níveis de porosidade total tendo, em cada nível, duas distribuições distintas de dimensões de poros.

A avaliação da influência da porosidade no transporte de água foi feita em função do conteúdo de umidade de equilíbrio, da absortividade de água e da penetração de água sob pressão.

Foi concluído que as dimensões e o volume total de poros influenciam diferentemente no transporte de água, dependendo se a água está em forma de vapor ou na forma líquida. O concreto de cimento com escória, com poros menores e maior volume total de poros que o concreto com cimento Portland absorveu mais vapor de água e menos água na forma líquida.

ABSTRACT

This paper presents the results of a research developed with the aim of analysing the influence of concrete total pore volume and pore dimensions on water transport through it.

The study was carried on with concretes having two levels of total porosity. In each level of porosity, there were two different pore dimensions. The evaluation of the influence of porosity on water transport was done with the analysis of equilibrium humidity content, water absorptivity and water penetration under pressure.

It was concluded that the pore dimension and total pore volume affects the water vapour and liquid water absorption in different ways. The slag cement concrete with finer pore and with more total porosity than Portland cement concrete absorbed more water vapour and less water in liquid form.

1. INTRODUÇÃO

A porosidade do concreto influi na sua durabilidade pois os agentes potencialmente causadores da corrosão de armaduras como o gás carbônico e os íons cloreto irão penetrar neste material com maior ou menor facilidade em função da morfologia, dimensões e quantidade de poros existentes.

O transporte destes agentes se dá principalmente por mecanismos de absorção capilar e difusão, podendo ainda ocorrer migração iônica no caso da penetração de cloretos. A taxa de transporte de agentes agressivos por meio da absorção e permeabilidade é governada pela taxa de penetração de água, pois somente através da umidade é que os agentes são transportados para o interior do concreto.

Além da água no estado líquido, a presença de umidade nos poros do concreto na forma de vapor influi também no ingresso dos agentes, principalmente o gás carbônico. Isto se deve ao fato de que a difusão é o principal processo pelo qual o dióxido de carbono penetra no concreto, atravessando os poros com ar e também com água. A difusão do CO_2 na fase líquida é de aproximadamente 10^4 vezes menor que na fase gasosa (HELENE, 1993). Por outro lado, se poros muito secos favorecem a difusão, dificultam a reação de carbonatação.

Para proteger a armadura é necessário, portanto, controlar a entrada dos agentes agressivos e também da umidade, agente interveniente no processo de deterioração do concreto armado.

Além de outras técnicas menos empregadas no país, como a proteção catódica, a proteção da armadura pode ser conferida pela utilização de revestimentos aplicados sobre o concreto, ou buscando a melhoria do desempenho deste enquanto barreira ao transporte de agentes agressivos e intervenientes o que, de uma forma genérica, implica na alteração de sua estrutura porosa.

Neste trabalho está apresentada parte dos resultados obtidos em um estudo desenvolvido, com apoio da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, para analisar a influência do volume total e das dimensões dos poros em propriedades de transporte de massa em concretos.

2. MATERIAIS

Foram estudados quatro materiais diferentes, com dois níveis de porosidade total, tendo em cada nível, duas distribuições distintas de dimensões de poros.

Para a obtenção de concretos com os dois níveis de porosidade total diferentes, foram selecionados para o estudo, dois traços de concreto com cimento Portland comum, com resistência à compressão característica de 20 MPa e 40 MPa que correspondem, respectivamente, ao concreto de resistência média de uso no mercado (entre 18 MPa e 22 MPa) e a um concreto com porosidade significativamente menor. O cimento escolhido foi o CP - I, por não conter adições. Os traços foram determinados a partir de dosagem experimental realizada pelo método do IPT (TANGO, 1993).

Para a obtenção de concretos com porosidade total semelhante, mas com distribuição de dimensões de poros menores, com os mesmos traços dos concretos de cimento Portland comum, foram preparados em laboratório, concretos substituindo-se 70% de cimento Portland por escória. O teor de substituição foi definido com base na Norma Brasileira - EB-208 - Cimento Portland de alto forno que estabelece este limite de adição.

Para identificar os concretos estudados foi adotada a codificação apresentada na Tabela 1:

Tabela 1 – Identificação dos concretos estudados

Identificação do concreto	Traço em massa (aglom.:agreg. miúdo:agreg. graúdo)	Aglomerante	Relação a/c
CP 20	1 : 1,4 : 2,6	Cimento Portland	0,76
CPE 20	1 : 1,4 : 2,6	Cimento Portland (30%) + escória (70%)	0,76
CP 40	1 : 2,84 : 4,16	Cimento Portland	0,44
CPE 40	1 : 2,84 : 4,16	Cimento Portland (30%) + escória (70%)	0,44

Todos os concretos preparados apresentaram consistência, medida com abatimento do tronco de cone (NBR 7223), de (60 ± 10) mm e teor de ar incorporado de 1,5%.

Visando a obtenção de superfícies que simulam o acabamento obtido em obra, os diversos traços de concreto foram preparados em forma de painéis. A moldagem foi feita através do lançamento do concreto em formas posicionadas verticalmente e o adensamento foi efetuado em mesa vibratória. Os painéis foram moldados com dimensões de 70 cm x 70 cm x 10 cm de forma a possibilitar a extração de vários corpos-de-prova para ensaios, sem contudo possuir tamanho excessivo que prejudicasse o seu manuseio e transporte. Após a moldagem, os painéis foram mantidos em câmara úmida por um período de 7 dias, para a obtenção de resistência necessária para o transporte. A partir deste período de cura, os painéis foram expostos, por um período de aproximadamente 240 dias, em estação de envelhecimento natural, localizada na Cidade Universitária, em São Paulo, latitude 23° 30'S e longitude 46° 37'W. A exposição foi feita com os painéis posicionados verticalmente e orientados para a direção norte.

3. MÉTODOS E RESULTADOS

Os métodos utilizados nos ensaios e os resultados encontrados estão apresentados a seguir:

3.1 Dimensões de poros de concretos por intrusão de mercúrio

A determinação das dimensões de poros dos concretos foi efetuada pelo método de intrusão de mercúrio. Para a utilização desta técnica, é necessário que os corpos-de-prova estejam previamente secos. No entanto, dependendo do procedimento utilizado na remoção da água dos poros podem ocorrer alterações na microestrutura do material. Assim foi utilizado o seguinte método para secagem dos corpos-de-prova (FELDMAN & BEAUDOIN, 1991):

- a) retirada da água dos poros e substituição por solvente através da imersão total em isopropanol anidro técnico por um período mínimo de 10 dias;
- b) imediatamente após retirada da imersão em álcool, secagem à vácuo por 20 horas em estufa mantida a 100°C.

No ensaio de porosimetria de mercúrio, o resultado é expresso em volume de mercúrio intrudido em relação à massa total do corpo-de-prova. Em função disto, considerando-se que a porosidade dos agregados é praticamente nula, corpos-de-prova extraídos de um mesmo

concreto, podem apresentar porosidades diferentes devido à maior ou menor quantidade de pasta contida nos mesmos. Na determinação da porosidade de concretos é necessário determinar então a fração de pasta presente nos corpos-de-prova ensaiados. Assim, após o ensaio com o porosímetro de mercúrio, foi determinada a quantidade de agregados presente nos corpos-de-prova ensaiados (SATO, 1998). Os resultados de porosidade foram expressos em volume de mercúrio intrudido em relação ao teor de pasta presente nos corpos-de-prova, e estão apresentados nas figuras 1 e 2:

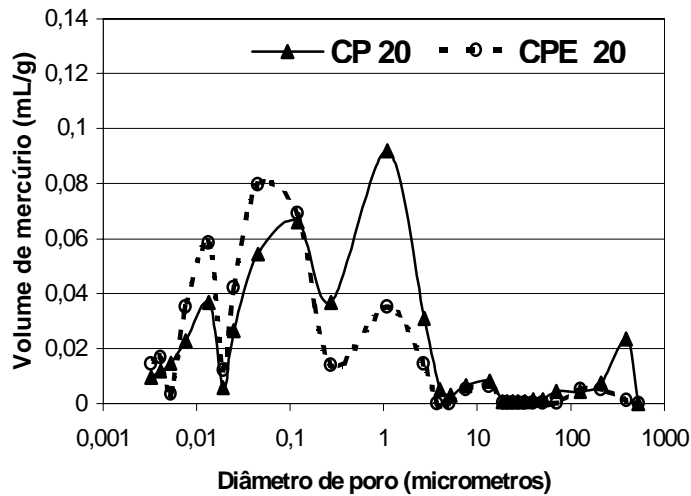


Figura 1 - Volume de mercúrio intrudido em função das dimensões de poros – Concreto CP 20, sem escória e CPE 20, com escória

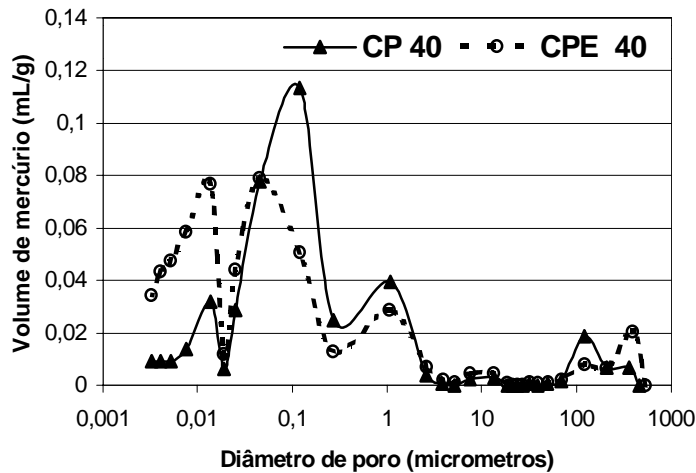


Figura 2 - Volume de mercúrio intrudido em função das dimensões de poros – Concreto CP 40, sem escória e CPE 40, com escória

Nas figuras 1 e 2 pode-se verificar que a adição contribui no sentido de diminuir a quantidade de poros maiores e aumentar o número de poros com menores dimensões. A presença de poros maiores, da ordem de 1 micrometro é ainda observada mesmo no concreto CPE 40, porém, em quantidade menor que o apresentado pelos outros concretos,

mostrando que a faixa de dimensões de poros é praticamente a mesma para todos os concretos, variando apenas a distribuição volumétrica em função da dimensão.

3.2 Determinação de índice de vazios

Tendo em vista as pequenas dimensões dos corpos-de-prova para ensaios através de porosimetria por injeção de mercúrio e considerando-se que as propriedades de transporte de massa em concretos não dependem somente da porosidade da sua capa, foi medido o índice de vazios das amostras do estudo conforme a norma NBR 9779/93 - Determinação de absorção de água por imersão, do índice de vazios e massa específica. Os valores médios de ensaios realizados com nove corpos-de-prova de cada material estão apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Índice de vazios

Concreto	Índice de vazios (%)
CP 20	13,7
CPE 20	15,8
CP 40	12,8
CPE 40	13,7

3.3 Absortividade de água

A maior parte dos procedimentos consultados para caracterização da absorção de água por capilaridade em argamassas e concretos, publicados tanto em trabalhos de pesquisa (CARPENTER et al, 1993; HALL et al, 1989) quanto em normas (NBR 9779, DIN 52617/87, AFNOR NF P 18-354/86), apresentam poucas variações. Consistem basicamente em colocar um corpo-de-prova apoiado sobre bastões de vidro ou de material não poroso em contacto com água, a uma profundidade de 2 a 10 mm, de forma que ocorra ascensão vertical do líquido no interior do material. Por meio de pesagens sucessivas dos corpos de prova retirados da água e superficialmente enxugados, é determinada a massa de água acumulada em função do tempo.

No presente trabalho, os ensaios foram realizados com corpos-de-prova cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, impermeabilizados na superfície lateral, mantendo-se as bases sem vedação. Os corpos-de-prova foram então colocados sobre hastes de alumínio, imersas em água, de forma a manter uma das bases em contacto com o líquido para permitir a sua penetração por capilaridade. As pesagens foram feitas na primeira hora de ensaio, a intervalos regulares de 10 minutos, e, depois, a cada hora até completar 3 horas de medição.

Tabela 3 – Absortividade de água das amostras ensaiadas

Concreto	Absortividade ($\text{mm}/\text{min}^{0,5}$)			
	Corpo-de-prova 1	Corpo-de-prova 2	Corpo-de-prova 3	Média
CP 20	0,082	0,133	0,090	0,10
CPE 20	0,058	0,067	0,046	0,057
CP 40	0,070	0,070	0,080	0,083
CPE 40	0,063	0,043	0,042	0,042

3.4 Teor de umidade de equilíbrio

O ensaio consistiu na determinação do teor de umidade de equilíbrio de concretos expostos em câmara climática, mantida à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(55 \pm 5)\%$. Corpos-de-prova de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura foram colocados neste ambiente e pesados a cada 24 horas. Considerou-se atingido o equilíbrio de massa dos corpos quando a diferença entre duas pesagens consecutivas foi inferior a 0,05% do valor da última massa medida. O teor de umidade foi calculado pela diferença entre a massa nas condições de equilíbrio com o ambiente e a massa do corpo-de-prova seco. A secagem foi feita em estufa mantida à temperatura de 105°C , até atingir a mesma condição de estabilidade de massa definida anteriormente. Na tabela 4 estão apresentados os resultados obtidos.

Tabela 4 – Teor de umidade de equilíbrio

Concreto	Teor de umidade de equilíbrio (%)			
	Corpo-de-prova 1	Corpo-de-prova 2	Corpo-de-prova 3	Média
CP 20	1,96	1,96	1,80	1,9
CPE 20	2,94	3,17	2,75	3,0
CP 40	3,21	3,17	3,17	3,2
CPE 40	4,19	4,40	4,10	4,2

3.5 Penetração de água sob pressão

O ensaio foi realizado de acordo com o procedimento especificado na norma NBR 10787/94 – Concreto endurecido – Determinação de penetração de água sob pressão. O ensaio é realizado com corpos-de-prova medindo $(250 \times 250 \times 125)$ mm, previamente secos ao ar, por um período de 24 horas antes do início das medições. O ensaio consiste em fixar o corpo-de-prova entre dois perfis metálicos, mantendo-se a superfície inferior, com dimensões de (250×250) mm, em contacto com água sob pressões crescentes e consecutivas, da seguinte forma:

- 48 horas à pressão de $(0,1 \pm 0,01)$ MPa;
- 24 horas à pressão de $(0,3 \pm 0,03)$ MPa;
- 24 horas à pressão de $(0,7 \pm 0,07)$ MPa.

Após estes períodos de aplicação de água sob pressão, o corpo-de-prova é partido ao meio, ortogonalmente à face onde foi exercida a pressão, medindo-se a profundidade máxima de penetração de água, em milímetros, e o perfil de distribuição da água penetrada

Verificou-se nos ensaios que nos concretos CP 20 e CPE 20 houve penetração de umidade ao longo de todo o corpo-de-prova, em todas as amostras ensaiadas. Já nos concretos CP 40

e CPE 40, a penetração de água ocorreu conforme ilustrados nas figuras 3 e 4, nas quais, a região branca representa a parte em que houve penetração e a região pontilhada, a parte não atingida pela água.

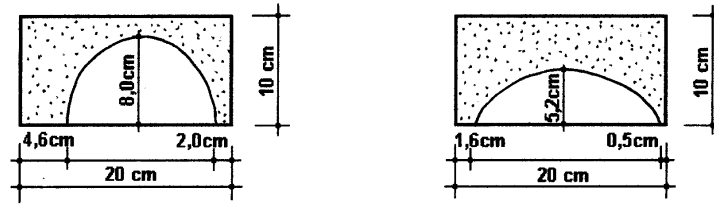


Figura 3– Penetração de água sob pressão em concreto CP 40

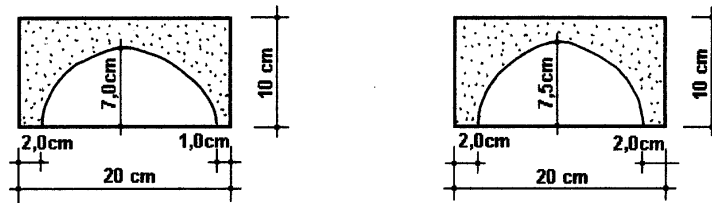


Figura 4 – Penetração de água sob pressão em concreto CPE 40

4. CONCLUSÕES

Comparando-se os resultados obtidos, verifica-se que, a um nível de confiança de 95%, existe diferença entre as absorvidades de todos os concretos. Os concretos com escória, embora tivessem maior índice de vazios, por terem poros de menores dimensões, apresentaram menor valor de absorvidade que os concretos sem escória.

Já no caso do teor de umidade de equilíbrio, foi verificado pelos resultados dos ensaios que os concretos com maior quantidade de poros menores, apresentaram maior quantidade de umidade ao ser exposto ao vapor de água presente na atmosfera. Vale ressaltar que o teor de umidade controla o acesso dos agentes agressivos para o interior do concreto, e também do oxigênio, elemento necessário para a ocorrência das reações de corrosão. O teor de umidade influi ainda na resistividade elétrica do concreto que, por sua vez, influi na velocidade de corrosão das armaduras. Entretanto, não existem ainda, resultados correlacionando teores de umidade com velocidades de corrosão.

Nos ensaios de penetração de água sob pressão, não foi observada diferença significativa entre os concretos de mesmo traço e com poros de dimensões diferentes. Resultados de estudos indicaram que as adições minerais diminuem tanto a porosidade da zona de transição, quanto a conectividade entre os poros (WINSLOW & COHEN, 1993). No entanto, as pressões aplicadas nos ensaios possivelmente foram suficientes para que a água atingisse os poros menores e também os menos conectados dos concretos com escória. Como o volume total de poros destes concretos era maior do que o dos concretos sem escória, a altura de água penetrada nos dois concretos não apresentou diferenças significativas. Embora estes últimos apresentem poros de menores dimensões, os seus índices de vazios medidos por meio da absorção de água são maiores que os medidos nos concretos sem escória (Tabela 2). Assim, embora a escória tenha contribuído no sentido de diminuir as dimensões dos poros e possivelmente a conectividade entre os mesmos, com a aplicação das pressões durante os períodos estabelecidos no método de ensaio utilizado, a água conseguiu atingir nos concretos

com escória os mesmos níveis de penetração que nos concretos sem escória. Deve-se considerar ainda a possibilidade de ter ocorrido a formação de uma quantidade maior de fissuras nos concretos com escória, contribuindo para a penetração de água sob pressão nos concretos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARPENTER, T.A., DAVIES, E.S., HALL C., HALL, D.L, HOFF, W.E., WILSON, M.A. Capillary water migration in rock: process and materials properties examined by NMR imaging. **Materials and Structures**, v.26, p.286-292, 1993.
- FELDMAN, R.F.; BEAUDOIN, J. J. Pretreatment of hardened hydrated cement pastes for mercury intrusion measurements. **Cement and Concrete Research**, v. 21, p. 297-308, 1991.
- HALL, C. Water sorptivity of mortars and concretes: a review. **Magazine of Concrete Research**, v.41, n. 147, 1989, p. 51-61.
- HELENE, PAULO R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. São Paulo, 1993. Tese (Livre docência). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. São Paulo, 1998. 163 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- TANGO, C.E.S. Concreto - Mistura sem mistério. **Revista Técnica**, n. 4, p. 20-23, Mai./Jun. 1993.
- WINSLOW, D. N.; COHEN, M. D. Percolation and pore structure in mortars and concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 24, p. 25 - 37, 1994.