

# Análise fluido-dinâmica do escoamento em ensaio de permeabilidade ao ar de argamassas preparadas com cimento Portland de alto-forno

## *(Fluid-dynamic analysis of the flow in air permeability measurement of mortars prepared with blast-slag furnace Portland cement)*

V. M. Pereira<sup>1,2</sup>, E. Carvalho<sup>1</sup>, P. S. Bardella<sup>1,2</sup>, G. Camarini<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Arquitetura e Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas

<sup>2</sup>Grupo de Estudos em Desenvolvimento Regional e Resíduos Industriais e de Construção - GEDRIC

### Resumo

O estudo dos fenômenos fluido-dinâmicos de escoamento em meios porosos tem sido de grande interesse por diversas áreas das ciências, de forma a se avaliar não só a permeabilidade do material, mas também analisar o comportamento do fluido permeante quando no interior destes materiais. Tratando-se de compósitos à base de cimento, a mensuração da permeabilidade torna-se fundamental para que sua durabilidade possa ser estimada, pois é a permeabilidade que controla a taxa de ingresso e movimentação de agentes deletérios no interior destes materiais. Dessa forma, diversas metodologias e equacionamentos matemáticos têm sido utilizados para prever a permeabilidade de materiais à base de cimento. No entanto, várias discrepâncias e disparidades nos resultados têm sido encontradas. Dentre as metodologias empregadas para mensurar a permeabilidade de meios porosos, encontra-se a desenvolvida por Thenoz, a qual tem demonstrado bons resultados em materiais à base de cimento. Dessa forma, este trabalho visa, por meio de ensaio de permeabilidade ao ar, realizado de acordo com a metodologia de Thenoz, avaliar o comportamento fluido-dinâmico do ar durante o ensaio de permeabilidade em argamassas. Para isto, foram utilizadas argamassas preparadas com dois tipos de cimento Portland (CP II E - 32 e CP III - 32), duas relações água/cimento (0,5 e 0,6) e ensaiadas em idades de 14 e 28 dias. Por meio dos resultados obtidos foi possível observar que durante o escoamento a compressibilidade do ar pode ser ignorada e o regime de escoamento pode ser considerado como laminar, demonstrando que a metodologia proposta por Thenoz e o equacionamento matemático empregado pode resultar em coeficientes de permeabilidade ao ar confiáveis, pois fenômenos e considerações que poderiam influenciar neste tipo de escoamento podem ser negligenciados.

**Palavras-chave:** argamassa, permeabilidade, metodologia de Thenoz, escoamento em meios porosos.

### Abstract

*Fluid-dynamic phenomena study in porous media flow has been of great interest for diverse areas of sciences. These studies not only have evaluated the permeability of porous media, but also to analyze the behavior of the fluid during the flow. Being about to the cement based materials, the measuring of the permeability becomes basic so that the durability of these can be estimate, therefore is the permeability that controls the rate of ingress and movement of deleterious agents inside these materials. Thus, diverse methodologies and mathematical equations have been used to foresee the permeability of cementitious materials, however, some discrepancies and nonsense in the results have been found. Amongst the used methodologies to measure the permeability of porous media, one meets developed it by Thenoz, which it has demonstrated good results in cement based materials. Thus, this work aims at, by means of assay of permeability to air, carried through in accordance with the methodology of Thenoz, to evaluate the fluid-dynamic behavior of air during the assay of permeability in mortars. For this, mortars prepared with two types of Portland cement of blast furnace (CP IIE-32 and CP III - 32), two relations water/cement (0.5 and 0.6) and ages of 14 and 28 days were used. By means of the gotten results it was possible to observe that during the draining the compressibility of air can be ignored, the regimen of draining can be considered as to plate, demonstrating that the methodology proposal for Thenoz and used mathematical equations can result in coefficients of trustworthy air permeability, therefore phenomena and considerations that could influence in this type of flow can be neglected, in accordance with what it is considered by literature.*

**Keywords:** mortar, permeability, Thenoz methodology, porous media flow.

## INTRODUÇÃO

A permeabilidade de compósitos à base de cimento tem sido vista como a principal responsável pela sua durabilidade, pois é a permeabilidade que controla a taxa de ingresso e movimentação de agentes agressivos no interior destes

materiais, podendo fazer com que não atinjam a vida útil para os quais foram projetados. Assim, várias metodologias têm sido propostas para avaliar esta propriedade em materiais à base de cimento, tendo como principais objetivos a busca por uma metodologia eficiente e economicamente viável. Neste sentido, tem-se procurado adaptar diversas

teorias e metodologias de avaliação da permeabilidade de meios porosos, visando encontrar uma que quantifique de maneira satisfatória os fenômenos de transporte neste tipo de mensuração, assim como gere resultados confiáveis da constante de permeabilidade [1-3]. Deste modo, devido ao grande número de metodologias e equações matemáticas empregadas na predição da permeabilidade de compósitos à base de cimento, diversas discrepâncias têm sido observadas, o que propõe uma análise mais detalhada e precisa deste tipo de ensaio, pois os resultados obtidos em algumas pesquisas podem não ter a confiabilidade adequada [4].

As discrepâncias dos resultados encontradas em ensaios de permeabilidade e a grande variedade de resultados obtidos podem ocorrer em função de inúmeros fatores, tais como adequação matemática à metodologia, não consideração de alguns fenômenos físicos pela equação matemática utilizada, adequação da equação matemática ao tipo de escoamento avaliado, entre outros [5]. Desta forma, para que os resultados provenientes do ensaio de permeabilidade e metodologias propostas sejam comprovados tem-se buscado não somente avaliar a permeabilidade do material, mas também o aparelho de ensaio utilizado, de forma a garantir a validade dos resultados obtidos e a credibilidade da metodologia, e também a credibilidade do aparelho de ensaio [6-7].

Uma das metodologias utilizadas para mensurar a permeabilidade ao ar de materiais à base de cimento é a desenvolvida por Thenoz [8]. Esta metodologia tem demonstrado boa aplicabilidade nestes tipos de materiais, mesmo tendo sido desenvolvida para determinar a permeabilidade de rochas. No entanto, para que a credibilidade dessa metodologia seja comprovada, algumas análises devem ser realizadas para avaliar o mecanismo de escoamento proporcionado por esta metodologia de forma a analisar a credibilidade de seus resultados.

Desta maneira, este trabalho visa avaliar o comportamento fluido-dinâmico do ar em ensaio de permeabilidade ao ar de argamassas preparadas com cimento Portland de alto-forno, segundo a metodologia proposta por Thenoz [8]. Para isso foram mensuradas a vazão e velocidade do escoamento, assim como número Mach e número Reynolds, com o intuito de se determinar o tipo de escoamento (laminar ou turbulento) e variações da massa específica do ar durante o escoamento.

#### *Análise fluido-dinâmica do escoamento em meios porosos*

A maioria dos ensaios de escoamento de fluidos através de meios porosos utiliza a equação de Darcy (Equação A) como base fundamental para a predição da permeabilidade. Não obstante, esta equação somente é válida para escoamentos que ocorrem no regime laminar, podendo tornar-se totalmente inválida quando o regime de escoamento é turbulento [9].

$$Q = -k \frac{A}{\mu} \cdot \frac{dh}{dx} \quad (A)$$

na qual  $Q$  = vazão ( $m^3/s$ ),  $k$  = constante de permeabilidade ( $m^2$ ),  $A$  = área de seção transversal do escoamento ( $m^2$ ),  $\mu$  =

viscosidade do fluido ( $Pa.s$ ) e  $dh/dx$  = perda de carga  $dh$  no comprimento  $dx$ .

Apesar da lei de Darcy ser utilizada na maioria dos estudos com a finalidade de se mensurar a permeabilidade de meios porosos, o seu uso deve ser avaliado, pois em sua formulação matemática foram considerados somente os fenômenos de perda de energia durante o escoamento, proporcionados pela viscosidade do fluido, ou seja, que representa os efeitos viscosos do escoamento - atrito entre as moléculas e interações entre o fluido e meio poroso. Dessa forma, o emprego da lei de Darcy é condicionado a escoamentos cuja velocidade seja lenta, ou seja, em regime laminar [10-13].

Mesmo com a utilização da lei de Darcy para escoamentos em regime laminar, ela está sujeita a algumas simplificações e descon siderações físicas, tais como [5]: a pressão ocasionada pelo fluido no interior da amostra pode ser desprezada; o efeito da temperatura pode ser negligenciado; a compressibilidade do fluido sob estado triaxial de tensões pode ser ignorada. Dentre as simplificações e descon siderações citadas, a influência da temperatura, da compressibilidade do fluido e do regime de escoamento, pode ser avaliada da seguinte maneira [5]:

**Temperatura** - A lei de Darcy (Equação A) foi desenvolvida para determinar a permeabilidade de meios porosos onde o fluido permeante utilizado é a água a 20 °C. No entanto, quando a mensuração da permeabilidade é realizada com outro fluido ou em outra temperatura, parâmetros tais como, o coeficiente viscosidade do fluido ( $\mu$ ) na temperatura deve ser corretamente empregado [14].

**Compressibilidade do fluido** - Para que a compressibilidade do fluido seja avaliada, pode-se utilizar o número Mach ( $M$ ), que tem a função de determinar se, durante o escoamento, ocorrem variações na massa específica do fluido permeante [15].

Para estabelecer se há compressibilidade do fluido durante o escoamento, o número Mach é mensurado. Se o seu resultado for inferior a 0,3, pode-se considerar que não há variações na massa específica do fluido, entretanto, se o resultado for maior que 0,3, ou seja,  $M > 0,3$ , a influência da compressibilidade do fluido durante o escoamento deve ser considerada pela equação matemática utilizada [16].

A variação da massa específica do fluido durante o escoamento ocorre devido a um efeito denominado *slip effect* ou *Klinkenberg effect*. Este fenômeno é proporcionado devido à ordem de grandeza das moléculas de gases serem da mesma ordem de grandeza dos poros capilares. Assim, para o escoamento de gases, a velocidade na parede dos poros não pode ser considerada como zero. Desta forma, este fenômeno torna-se significativo somente quando as dimensões das moléculas do fluido são próximas às dimensões dos poros permeáveis do meio poroso, ou seja, em escoamentos de gases em meios porosos [17].

**Regime de escoamento** - Para avaliar se em predições da permeabilidade com o emprego da lei Darcy a metodologia empregada garante que o escoamento ocorra em regime laminar, pode-se utilizar o número Reynolds. Em seu

experimento clássico, Reynolds avaliou o comportamento do movimento das moléculas de água durante o escoamento dentro de um tubo de vidro, verificando haver dois tipos distintos de escoamento: laminar e turbulento. Reynolds verificou que a velocidade do escoamento distinguia e determinava estes escoamentos. No regime de escoamento laminar as moléculas de água escoavam paralelamente ao tubo. Entretanto, quando havia um acréscimo na velocidade do escoamento, ocorria um movimento randômico (aleatório) das moléculas do fluido, fazendo com que o escoamento passasse a ser turbulento [18]. Assim, Reynolds generalizou suas observações e introduziu um termo adimensional ( $R$ ) que, posteriormente, veio a levar seu nome e tem a função de distinguir os tipos de regime de escoamento. Em seu experimento com tubos, Reynolds constatou haver três fases distintas de regime de escoamento em função da velocidade do fluido. A primeira fase é caracterizada como regime de escoamento laminar, ou seja, números de Reynolds menores que 2100. Uma segunda fase caracterizada por  $R$  entre 2100 e 4000, onde há uma região de incerteza, ou seja, passagem do regime laminar para o regime de escoamento turbulento. A terceira, e última fase, pode ser distinguida como regime de escoamento turbulento, caracterizada por números de Reynolds acima de 4000 [19]. Para escoamento em meios porosos, a magnitude do número Reynolds deve ser reformulada, pois o escoamento não ocorre da mesma maneira que em tubos cilíndricos, pois em meios porosos, para que o escoamento possa ser considerado como laminar, este deve possuir números de Reynolds demasiadamente baixos, ou seja,  $R \ll 1$  [20].

#### Metodologia Thenoz

A metodologia proposta por Thenoz [8] foi desenvolvida com o intuito de mensurar a permeabilidade ao ar de rochas e tem demonstrado bons resultados na quantificação deste tipo de permeabilidade de materiais à base de cimento [4]. Esta metodologia consiste em mensurar a permeabilidade ao ar de meios porosos em função do tempo necessário para que o líquido contido no tubo capilar desloque-se da altura  $h_0$  até  $h_1$ . A Fig. 1 mostra a localização dessas alturas, cuja determinação foi realizada a partir da estipulação da altura  $h_0$  para que em seguida, a altura  $h_1$  fosse determinada a partir da relação  $\ln h_0/h_1=1$  [22]. A adoção desta igualdade foi realizada em função desta determinar o tipo de escoamento desejado, ou seja, laminar ou turbulento, sendo que para a relação  $\ln h_0/h_1=1$ , o escoamento caracteriza-se como laminar [21].

O deslocamento do fluido é proporcionado por um diferencial de pressão entre as duas faces da amostra, ocasionado pelo líquido utilizado no interior do tubo. Por meio do gradiente de pressão criado, o ar é forçado a atravessar o interior dos poros da amostra.

A partir da determinação do tempo decorrido para que o líquido se desloque da altura  $h_0$  até  $h_1$  e outras características físicas do fluido permeante, a permeabilidade pode ser determinada por meio da Equação B.

$$k = \frac{\mu}{\rho \cdot g} \cdot \frac{s}{S} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \cdot \frac{\ell}{t} \quad (B)$$

na qual  $k$  = coeficiente de permeabilidade ao ar ( $m^2$ );  $\mu$  = viscosidade do ar na temperatura ambiente ( $Pa \cdot s$ );  $s$  = área de seção transversal do tubo capilar ( $m^2$ );  $\ell$  = altura do corpo-de-prova ( $m$ );  $\rho$  = massa específica do fluido utilizado no tubo capilar ( $g/cm^3$ );  $S$  = área de seção transversal da amostra ( $m^2$ );  $h_0$  = altura inicial ( $m$ );  $h_1$  = altura final ( $m$ ) e  $t$  = tempo necessário para o líquido deslocar-se da altura  $h_0$  até  $h_1$  ( $s$ ).

A Equação B é proveniente da Lei de Darcy com algumas modificações devido ao fluido permeante utilizado ser o ar, onde a forma diferencial original da equação de Darcy é integrada usando as condições apropriadas para o escoamento de gases, ou seja, que o escoamento ocorre à temperatura constante e em estado estacionário. Além das modificações anteriormente citadas, esta equação também considera a variação da pressão do gás no decorrer do ensaio, também denominado *slip effect*, assim como a diminuição da pressão ao longo da amostra [18].

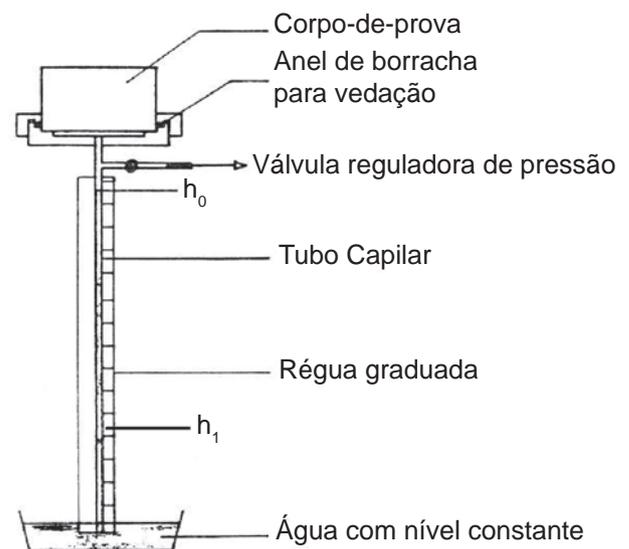


Figura 1: Aparelho de ensaio de permeabilidade ao ar [21].

[Figure 1: Apparatus for air permeability test [21].]

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para os ensaios de permeabilidade ao ar, de acordo com a metodologia proposta por Thenoz [8], foram utilizadas

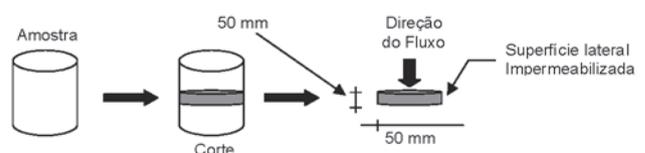


Figura 2: Preparação das amostras para ensaio de permeabilidade ao ar.

[Figure 2: Preparations of the specimens for air permeability tests.]

Tabela I - Caracterização dos materiais.  
[Table I - Materials characterization.]

Material	Propriedades			
Cimento CP II E – 32	Módulo de Finura (Resíduo na Peneira # 200).....	0,91		
	Finura <i>Blaine</i> ( $m^2/Kg$ ).....	313,35		
	Massa Específica.....	3,1		
	Início de Pega ( <i>min</i> ).....	238		
	Fim de Pega ( <i>min</i> ).....	306		
	Pasta de Consistência Normal.....	0,28		
	Resistência à Compressão ( <i>MPa</i> )	14 dias	28 dias	
		a/c = 0,5.....	35,0.....	31,0
		a/c = 0,6.....	30,0.....	25,0
	Cimento CP III – 32	Módulo de Finura (Resíduo na Peneira # 200).....	0,73	
Finura <i>Blaine</i> ( $m^2/Kg$ ).....		387,02		
Massa Específica.....		3,4		
Início de Pega ( <i>min</i> ).....		245		
Fim de Pega ( <i>min</i> ).....		306		
Pasta de Consistência Normal.....		0,28		
Resistência à Compressão ( <i>MPa</i> )		14 dias	28 dias	
		a/c = 0,5.....	27,6.....	38,0
		a/c = 0,6.....	23,3.....	33,0
Agregado miúdo		Módulo de finura.....	2,56	
	Dimensão Máxima Característica ( <i>mm</i> ).....	2,39		

Tabela II - Descrição das amostras utilizadas no experimento.

[Table II - Specimens description employed in the tests.]

Amostra	Traço (cimento: areia: a/c)	Cimento	Idade de ensaio (dias)
AM1	1:3:0,5	CP II E – 32	14
AM2	1:3:0,6	CP II E – 32	14
AM3	1:3:0,5	CP II E – 32	28
AM4	1:3:0,6	CP II E – 32	28
AM5	1:3:0,5	CP III – 32	14
AM6	1:3:0,6	CP III – 32	14
AM7	1:3:0,5	CP III – 32	28
AM8	1:3:0,6	CP III – 32	28

argamassas preparadas com dois tipos de cimento Portland (CP II E – 32 e CP III 32) com relações água/cimento de 0,5 e 0,6 e ensaiadas aos 14 e 28 dias. Para isso, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões 5 x 10 cm<sup>2</sup>, sendo estes desmoldados 24 h após a moldagem, permanecendo em ambiente de laboratório, ou seja, umidade relativa do ar de aproximadamente 70% e temperatura de aproximadamente 23 °C, até a data dos ensaios. Em seguida, foram cortadas fatias com dimensões de 5 x 5 cm<sup>2</sup> dos corpos-de-prova cilíndricos e o restante da amostra foi descartado. Essas fatias tiveram suas superfícies laterais

impermeabilizadas, de forma a garantir que o fluxo de ar no interior da amostra fosse uniaxial e perpendicular à área de secção transversal da amostra, conforme pode ser observado na Fig. 2.

As características físicas dos materiais utilizados e as nomenclaturas e características das amostras utilizadas estão nas Tabelas I e II, respectivamente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Vazão do escoamento

A mensuração da vazão média do escoamento foi realizada pela determinação do tempo necessário para que o ar ocupasse um determinado volume no tubo capilar. O volume de ar que passou através da amostra foi determinado a partir do produto da área de secção transversal do tubo mostrado na Fig. 1 pela diferença das distâncias  $h_0$  e  $h_1$  (Equação C). Em seguida, a vazão média foi determinada pela relação do volume escoado pelo tempo para que o ar ocupasse o volume correspondente, ou seja, volume correspondente à distância  $h_0$  até  $h_1$ .

$$Q_{\text{média}} = \frac{\Phi_{\text{tubo}} \times (h_0 - h_1)}{t_{h_0 \rightarrow h_1}} \quad (C)$$

na qual  $Q_{\text{média}}$  = vazão média ( $m^3/s$ );  $\Phi_{\text{tubo}}$  = área de secção

transversal do tubo capilar ( $m^2$ );  $h_0$  e  $h_1$  = altura inicial e final, respectivamente ( $m$ )  $t_{h_0 \rightarrow h_1}$  = tempo necessário para o líquido localizado no tubo capilar deslocar-se da altura  $h_0$  até  $h_1$  ( $s$ ).

Os resultados da vazão do escoamento mostraram que não houve diferenças significativas entre as amostras, conforme pode ser observado na Fig. 3. Este comportamento demonstra que em todas as amostras o escoamento ocorreu de forma similar, o que comprova o bom desempenho do permeâmetro utilizado, garantindo fluxos parecidos em todas as amostras ensaiadas. O bom desempenho deste permeâmetro para mensuração de materiais à base de cimento também tem sido observado em outras pesquisas que tem indicado a sua utilização por meio dos bons resultados obtidos [4- 22].

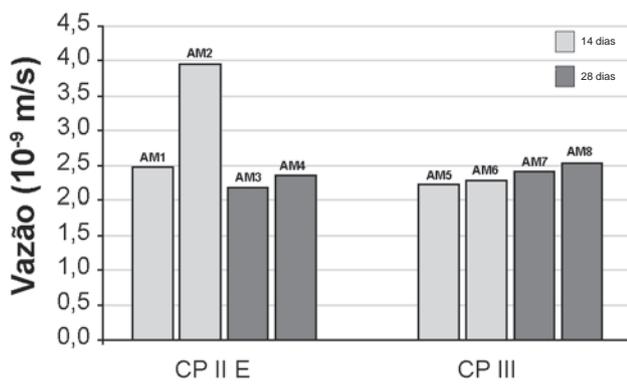


Figura 3: Vazão média do escoamento.

[Figure 3: Average outflow.]

Em relação aos diferentes tipos de amostras avaliadas, ou seja, em função do tipo de cimento, relação água/cimento, e idade de hidratação, foi possível observar que as amostras preparadas com cimento CP III tiveram menores vazões do que as preparadas com CP II E. Estes resultados são condizentes com a literatura, ou seja, que a maior quantidade de escória de alto-forno proporciona uma diminuição da porosidade de materiais à base de cimento, por meio do refinamento do diâmetro dos poros [23]. Na Fig. 3 também é possível observar que as vazões aumentaram com o aumento da relação água/cimento. Este comportamento já era esperado, pois o aumento da relação água/cimento aumenta a porosidade do material, aumentando também a quantidade de poros capilares responsáveis pelo fluxo de fluidos através da amostra [23]. Estes comportamentos observados podem ser comprovados por meio da maior vazão obtida para a amostra AM2, na qual uma maior relação água/cimento somado a um menor grau de hidratação (menor idade) resultaram em maior porosidade do material a base de cimento.

#### Velocidade média do escoamento

A partir da quantificação da vazão média do escoamento, foi possível determinar a velocidade média deste, por meio da relação entre a vazão média e a área de secção transversal

da amostra, conforme pode ser observado na Equação D. Como a área de secção transversal foi constante em todas as amostras, a velocidade média se comportou da mesma forma que a vazão em relação às características das amostras.

$$V_m = \frac{Q_m}{A} \quad (D)$$

na qual  $V_m$  = velocidade média do escoamento ( $m/s$ ),  $Q_m$  = vazão média do escoamento ( $m^3/s$ ) e  $A$  = área de secção transversal da amostra ( $m^2$ ).

O comportamento da velocidade média do escoamento, conforme pode ser observado na Fig. 4, em função das características das amostras analisadas foi condizente com as propriedades microestruturais, ou seja, onde a maior velocidade média obtida foi na amostra com menor idade e maior relação água/cimento (AM2), comprovando que um menor grau de hidratação e maior relação água/cimento influenciam a estrutura interna de materiais à base de cimento e em suas características de permeabilidade [21-25]. O tipo de cimento utilizado também influenciou significativamente nos resultados da velocidade média do escoamento, isto pode ter ocorrido pelo mesmo motivo que na vazão, ou seja, a maior quantidade de escória de alto-forno tem uma menor velocidade de reação do que os compostos potenciais presentes no cimento, dessa forma cimentos com adição de escória têm propriedades melhoradas somente a idades avançadas [23-26].

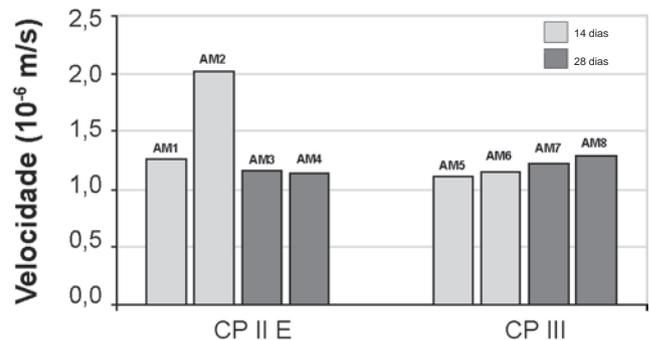


Figura 4: Velocidade média do escoamento.

[Figure 4: Average flow velocity.]

#### Número Mach

A partir da determinação do número Mach do escoamento procurou-se avaliar se durante o ensaio de permeabilidade ao ar há algum tipo de variação em sua massa específica [13]. A obtenção do número Mach do escoamento nas amostras de argamassa foi realizada a partir da relação entre a velocidade média do escoamento e a velocidade média do som no fluido permeante - ar (Equação E). Por meio da mensuração do número Mach é possível avaliar se durante o ensaio, de acordo com a metodologia proposta por Thenoz [8], fenômenos ocasionados pela compressibilidade do ar podem ser ignorados [5].

$$M = \frac{V_m}{c} \quad (E)$$

na qual  $M$  = Número Mach (*adimensional*),  $V_m$  = Velocidade média do fluido durante o escoamento ( $m/s$ ) e  $c$  = velocidade média do som no ar (343,0  $m/s$ ).

Foi estipulado que em meios porosos, o número Mach ( $M$ ) é menor que 0,3. Para  $M < 0,3$  não há variações na massa específica do fluido durante o escoamento [17]. Quando  $M > 0,3$ , fenômenos decorrentes da variação da massa específica devem ser considerados. Os resultados mostraram que os números Mach obtidos, segundo a metodologia proposta por Thenoz, foram da oitava ordem de grandeza exponencial negativa (Fig. 5), portanto muito abaixo dos estipulados [17], o que faz com que a compressibilidade do fluido durante o escoamento possa ser desprezada [17]. Na Fig. 5 pode-se observar também que não houve grandes variações dos resultados do número Mach entre as amostras e que a baixa velocidade média do escoamento, proporcionada pela baixa porosidade capilar das amostras analisadas, pode ter feito com que não ocorressem variações na massa específica do ar no seu interior. No entanto, variações na massa específica de fluidos permeantes podem ser proporcionadas não somente por este fenômeno, mas também pela queda de pressão ao longo da amostra e quanto menos permeável for a estrutura porosa, os efeitos da compressibilidade são mais acentuados [28].

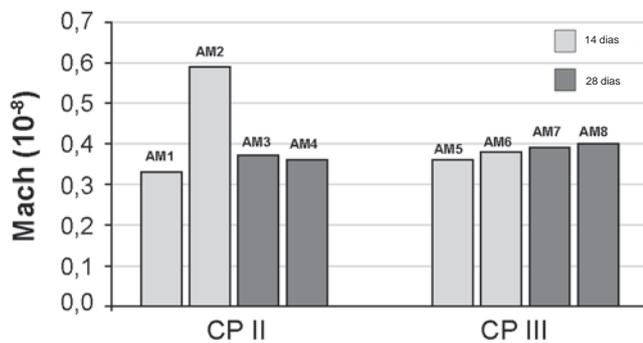


Figura 5: Número Mach do escoamento.

[Figure 5: Mach number.]

#### Número de Reynolds

O número Reynolds foi obtido em função de características do escoamento: da velocidade média, das características do fluido permeante, isto é, massa específica e viscosidade do fluido, e das características da amostra (diâmetro) de acordo com a Equação F.

$$R = \frac{V_m d \rho}{\mu} \quad (F)$$

na qual  $R$  = Número de Reynolds (*adimensional*),  $V_m$  = Velocidade média do escoamento ( $m/s$ ),  $d$  = diâmetro hidráulico ( $m$ ),  $\rho$  = massa específica do fluido ( $Kg/m^3$ ) e  $\mu$  = viscosidade do fluido ( $Pa.s$ ).

Os resultados mostraram, Fig. 6, que em todas as amostras o número Reynolds foi da terceira ordem de grandeza exponencial negativa, podendo, desta forma, classificar o escoamento como regime laminar, visto que como meios porosos possuem escoamento de fluidos demasiadamente baixos, para que o escoamento possa ser considerado como laminar, este deve apresentar número Reynolds  $\ll 1$  [20]. Por meio da Fig. 6 e da Equação F é possível observar também que conforme a velocidade do escoamento aumenta, o número Reynolds também aumenta, pois o aumento da velocidade do fluido proporciona um movimento randômico das suas moléculas, fazendo com que ocorra aumento da turbulência do escoamento. No entanto, não é somente o aumento da velocidade do fluido durante o escoamento que pode ocasionar turbulência no escoamento, pois o aumento da turbulência pode ser ocasionado também pela variação do diâmetro dos poros, já que quando Reynolds determinou a equação para medir a turbulência do escoamento em seus experimentos com tubos, este trabalhou com tubos cilíndricos, onde não havia variação na área de secção transversal, o que não ocorre em meios porosos, ou seja, há uma variação do diâmetro dos poros capilares em meios porosos [28].

Os resultados do número Reynolds obtidos também puderam comprovar que a utilização da relação  $\ln h_0/h_1=1$  na metodologia proposta por Thenoz [8] gera escoamentos sob regime laminar.

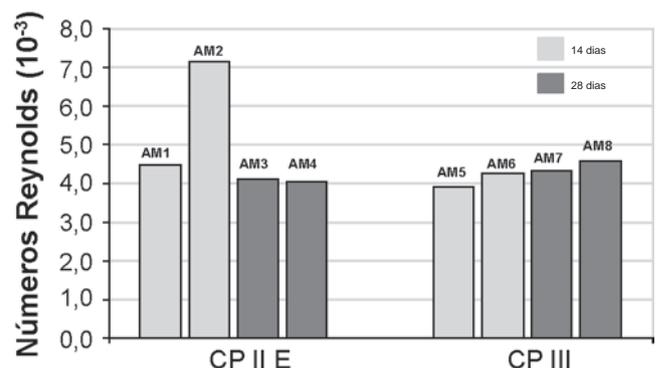


Figura 6: Número Reynolds do escoamento.

[Figure 6: Reynolds number.]

## CONCLUSÕES

Devido aos baixos valores do número Mach, a compressibilidade do ar durante o escoamento em ensaios de permeabilidade ao ar de argamassas pode ser desconsiderada; De acordo com os resultados do número de Reynolds obtidos, o escoamento do ar, de acordo com

a metodologia proposta por Thenoz, pode ser considerado como laminar. Para a determinação dos números Reynolds e Mach, de acordo com a metodologia empregada, a correta quantificação da vazão e velocidade do escoamento são de importância fundamental, pois são estas as principais variáveis que determinarão a mensuração e qualificação de fenômenos fluido-dinâmicos: compressibilidade do fluido e regime de escoamento. A utilização da metodologia proposta por Thenoz [8] mostrou-se eficiente para mensurar a permeabilidade ao ar de argamassas, pois fenômenos que poderiam comprometer a validade dos resultados, tais como compressibilidade do fluido durante o ensaio e regime de escoamento, podem ser considerados como insignificantes, de acordo com o que é proposto pela literatura.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP e ao CNPq pela bolsa de estudos (Proc. 133850/2006-4).

## REFERÊNCIAS

- [1] G. R. Martin, "A method for determining the relative permeability of concrete using gas", *Mag. Concrete Res.* **38**, 135 (1986).
- [2] M. A. Sanjuán, R. M. Martialay, "Variability of the concrete air permeability coefficient with time", *Building and Environment* **32** (1997) 51-55.
- [3] P. J. Tumidajski, B. Lin, "On the validity of the Katz-Thompson equation for permeabilities in concrete", *Cement Concrete Res.* **28** (1998) 643-647.
- [4] D. Perraton, A. C. Gibergues, P. C. Aitcin, B. Thenoz, "Air permeability measurement", *Mater. Res. Soc.* **137**, (1989) 191-201.
- [5] N. Banthia, S. Mindess, "Water permeability of cement paste", *Cement Concrete Res.* **19** (1989) 727-736.
- [6] D. S. Springer, H. A. Loaiciga, S. J. Cullen, L. G. Everret, "Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions", *Ground Water* **36** (1998) 558-565.
- [7] R. Carther, J. W. Figg, A. F. Marsden, T. P. O'Brien, "Improvements to the Figg method for determining the air permeability of concrete", *Mag. Concrete Res.* **36** (1984) 241-245.
- [8] B. Thenoz, "Mesure de la perméabilité et de la porosité des roches très compactes", *G.R.A.S.* **243** (1964) 289-291 *apud* D. Perraton, A. C. Gibergues, P. C. Aitcin, B. Thenoz, "Air permeability measurement", *Mater. Res. Soc.* **137** (1989) 191-201.
- [9] S. L. Vieira, "Determinação do coeficiente de inércia no escoamento não-darciniano através de meios porosos com saturação residual", Diss. Mestrado, UNICAMP (1990) 71pp.
- [10] A. C. S. Telles, G. Massarani, "Escoamento de fluidos através de meios porosos anisotrópicos", COPPE, Rio de Janeiro (1972).
- [11] J. K. Vennard, R. L. Strett, *Elementos de mecânica dos fluidos*, Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro (1978).
- [12] V. L. Streeter, *Mecânica dos fluidos*, Ed. MacGraw-Hill do Brasil, S. Paulo (1877).
- [13] J. M. Gaidis, E. M. Gartner, *Materials Science of Concrete II: Hydration Mechanisms II*, Ed. J. Skalny, S. Mindess, Am. Ceram. Soc., EUA (1991).
- [14] R. E. Goodman, *Introduction to Rock Mechanics*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, New York, EUA (1976).
- [15] E. A. Moreira, M. D. M. Innocentini, V. R. Salvini, V. C. Pandolfelli, J. R. Coury, "Permeabilidade de cerâmicas celulares", *Rev. Univ. Rural - Sér. Ciências Exatas e da Terra, UFRRJ*, 21 (2002) 177-185.
- [16] I. H. Shames, *Mecânica dos Fluidos: Princípios Básicos*, vol. 2, Macgraw-Hill, S. Paulo (1973).
- [17] E. F. A. Lisboa, "Uma abordagem multi-escala para o cálculo da permeabilidade longitudinal de meios porosos fibrosos randômicos", Diss. Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro (2000) 190pp.
- [18] F. A. L. Dullien, *Porous Media - Fluid and pore structure*, 2<sup>a</sup> Ed., Academic Press, Inc., London (1992).
- [19] R. V. Gilles, *Mecânica dos fluidos e hidráulica*, Ed. Ao livro Técnico, Rio de Janeiro (1967).
- [20] C. M. Scheid, G. Massarani, "Escoamento acelerado de fluido não-newtoniano através de meio poroso", *Anais AXXVIII IMNEP, Teresópolis, RJ* (2000).
- [21] E. L. Ferreira Jr. "Avaliação das propriedades de concretos de cimento Portland de alto-forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura", Diss. Mestrado, UNICAMP (2003) 141pp.
- [22] F. B. Bodin, R. H. Zaharieva, "Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete", *Mater. Struct.* **35** (2002) 504-509.
- [23] A. M. Neville, *Propriedades do Concreto*, Ed. Pini, S. Paulo (1982).
- [24] M. Robler, I. Odler, "Investigations on the relationship between porosity, structure na porosity of hydrated Portland cement pastes. I. Effect of porosity", *Cement Concrete Res.* **15** (1985) 320-330.
- [25] J. P. Ollivier, M. Massat, "Permeability and microstructure of concrete: a review of modelling", *Cement Concrete Res.* **22** (1992) 503-514.
- [26] I. J. Silva, J. B. L. Libório, A. B. De Melo, "Medida da estrutura porosa de pasta e concreto de cimento Portland", *Anais 41a REIBRAC - Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto, Salvador* (1999).
- [27] M. D. M. Innocentini, A. R. F. Pardo, V. C. Pandolfelli, "Influência da compressibilidade do ar na obtenção de parâmetros de permeabilidade de concretos refratários", *Anais 43º Cong. Bras. Cerâmica, Florianópolis, SC* (1999).
- [28] A. Firoozabadi, L. D. Katz, "An analysis of high-velocity gas flow through porous media", *J. Petroleum Techn.* (1979).