

## Filter paper method to determine the water retention curves for mortar and cement samples

### *Utilização do método do papel-filtro para determinação de curvas de retenção de água em argamassas e concretos*



J. M. L. VILASBOAS<sup>a</sup>  
josemarcilio@oi.com.br

S. L. MACHADO<sup>b</sup>  
smachado@ufba.br

S. A. PINTO<sup>b</sup>  
silas.andrade14@gmail.com

#### Abstract

This study deals with the application of the filter paper method to determine water retention curves for mortar and concrete samples. A water retention curve exhibits the relationship between water content and energy state in interstitial water, normally expressed as a negative value when compare to normal conditions of temperature and pressure, being referred to as suction. Considering the water retention curve as a basic characterization tool for unsaturated soils, its usage in the engineering field concerning most of the construction materials remains as a pending task. However, stating that not only permeability, but also the water retention curve performs a significant role for water and soluble substances flow through a material's pores makes this observation essential for life-span estimation in cases like reinforced-concrete structures. This research paper offers results for water retention curves obtained in mortar and concrete samples. The experimental curves went through a fitting adjustment process using Van Genutchen's [1] model, showing consistency with the obtained results. Furthermore, the water/cement mix ratio does not indicate or suggest a direct influence for water retention curves.

**Keywords:** water retention curves, suction, filter paper, concrete, mortar.

#### Resumo

Este trabalho trata do uso da técnica do papel-filtro para a obtenção, em laboratório, de curvas de retenção de água em corpos de prova de argamassa e concreto. A curva de retenção correlaciona o conteúdo de água de meios porosos com o estado de energia da água intersticial, que em condições não saturadas (vazios não totalmente preenchidos por água) é normalmente negativo em relação às condições normais de temperatura e pressão, sendo denominado de sucção. Embora possa ser descrita como uma ferramenta básica de caracterização de solos não saturados, o uso da curva de retenção em concretos e argamassas ainda não foi introduzido na prática da engenharia para a maioria dos materiais de construção. Pode-se dizer, contudo, que não somente a permeabilidade, mas também a curva de retenção desempenha um papel fundamental no fluxo de água e substâncias solúveis pelos poros do material, sendo imprescindível o seu conhecimento, para, por exemplo, estimar a vida útil das estruturas de concreto armado. São apresentados resultados de ensaios de sucção total pelo método do papel-filtro, os quais permitiram determinar curvas de retenção para corpos de prova de concreto e argamassa. Estas curvas foram ajustadas segundo o modelo de Van Genutchen [1], o qual apresentou boa aderência aos valores experimentais. Não foi possível observar influência significativa da relação água-cimento nas curvas de retenção obtidas.

**Palavras-chave:** curva de retenção, sucção, papel-filtro, concreto, argamassa.

<sup>a</sup> UCSAL, Materiais, Engenharia, Petrobras, Salvador, BA, Brasil;  
<sup>b</sup> DCTM, Engenharia, UFBA, Salvador, BA, Brasil.

## 1. Introdução

Para que o processo de fluxo ou o transporte de uma substância solúvel em água possa ser simulado, é necessário o conhecimento não somente da permeabilidade saturada do meio, mas também de suas curvas de retenção e de condutividade hidráulica. A curva de retenção correlaciona o conteúdo de água de meios porosos com o estado de energia da água intersticial. Este estado de energia é normalmente representado por pressões negativas (com referência à pressão atmosférica padrão) na água presente nos poros do material, em decorrência de fenômenos como a capilaridade e a adsorção, sendo estas pressões negativas denominadas de sucção. Embora possa ser descrita como uma ferramenta básica de caracterização de solos não saturados, o uso da curva de retenção em concretos e argamassas ainda não foi introduzido na prática da engenharia para a maioria dos materiais de construção. Além disso, as condições de contorno às quais está inserida a estrutura influenciam nos resultados a serem obtidos. Desta forma, o conhecimento prévio da sucção e de sua variação com o teor de umidade, devido à evaporação, é de fundamental importância para realizar uma análise, por exemplo, da penetração de substâncias solúveis como os cloretos em peças de concreto e argamassa, quando submetidas à agressividade marítima.

A sucção nos meios porosos é uma medida do estado da energia da água intersticial que está associada com a sua capacidade de reter água, sendo normalmente expressa em termos de carga hidráulica (energia por peso) ou de pressão (energia por volume). Quando a água livre é posta em contato com um meio poroso, como a argamassa ou o concreto, ela é retida ou absorvida por ele, até o limite em que todos os vazios estejam preenchidos com água (condição de meio poroso saturado). Para remover esta água do meio poroso, energia tem de ser aplicada, indo de encontro às forças de retenção do material, que se originam, principalmente, dos fenômenos de capilaridade, adsorção e osmose. Quanto mais secos os concretos e argamassas, maior será a sua sucção, de forma que, durante um processo de secagem, a água passa a ser armazenada nos poros de menores diâmetros e na superfície das partículas sólidas, formando o filme de água adsorvido.

A determinação da curva de retenção de um meio é também realizada de forma rotineira na física dos solos para obtenção dos

limites de sucção, dentro dos quais se deve situar um solo no cultivo de uma determinada cultura: capacidade de campo e ponto de murcha. Na capacidade de campo (cerca de 30 kPa de sucção), a água intersticial começa a fluir sob o potencial gravitacional, de forma que uma adição adicional de água somente fará com que a água infiltre além dos rizomas da cultura empregada. Na capacidade de campo (equivalente a uma sucção de 1500 kPa), admite-se que a água presente no solo se torna indisponível para as plantas.

Na área geotécnica, são vários os processos utilizados para a determinação da curva de retenção. De acordo com Machado e Presa [2], existe uma tendência à utilização de diferentes técnicas combinadas para a obtenção da curva de retenção. Assim, por exemplo, tem-se o uso da placa de sucção (pressão de água,  $u_w < 0$  e pressão de ar,  $u_a = 0$ ) para baixos valores de sucção (até cerca de 70 kPa), da câmara de pressão para valores intermediários (até 1500 kPa) e do papel-filtro para altos valores de sucção. A tabela 1 apresenta os intervalos típicos de utilização de diferentes técnicas de imposição/medida de sucção.

Assim como nos solos, os dois principais mecanismos de retenção de água pelo concreto são a capilaridade e a adsorção. Estes mecanismos diminuem a energia específica do fluido de forma que, sob a condição de não saturação dos poros, a pressão da água intersticial apresenta-se menor do que a atmosférica. Isso explica o fenômeno da ascensão capilar. Ascender significa galgar cotas mais elevadas, ou seja, o fluido se desloca para uma posição de maior potencial gravitacional. Como todo fluido somente flui de um maior potencial de energia para um menor, considerando-se os termos da equação de Bernoulli, a pressão da água dentro do meio não saturado necessariamente deve ser menor que a atmosférica. Para que se trabalhe sempre com valores positivos, é comum se utilizar o conceito de sucção intersticial ou matricial, que nada mais é do que a diferença entre os valores de pressão do ar (normalmente atmosférica) e da água, provocada pelos fenômenos de capilaridade e adsorção, ou seja:  $sucção = u_{ar} - u_w$ , onde  $u_{ar}$  corresponde à pressão na fase ar e  $u_w$  à pressão na fase água. A NBR 9779 [3] prescreve a ascensão capilar como método para determinação da absorção de água em argamassa e concreto endurecidos, sendo que a amostra deve ser constituída de no mínimo três corpos de prova, os quais poderão ser moldados ou

**Tabela 1 – Algumas das técnicas utilizadas para medida/imposição de sucção em solos**

Técnica	Componente da sucção medida	Faixa de medida (kPa)
Papel filtro	Total e matricial	10 – 30 000
Sensor de condutividade térmica	Matricial	0 – 400
Tensiômetros	Matricial	0 – 70
Microtensiômetros	Matricial	0 – 1500
Técnicas de eixos Hilf	Matricial	0 – 1500
Equilíbrio de vapor	Matricial	0 – 1500
Equilíbrio de vapor	Total	3000 – $3,0 \times 10^5$
Placas de pressão	Matricial	0 – 70
Psicômetros	Total	500 – 8000

Fonte: Adaptado de Machado e Presa (2).

extraídos da estrutura. A ascensão capilar observada é, contudo, não só o resultado do efeito conjunto da sucção capilar e da adsorção na redução da energia da água intersticial, mas também o resultado do aumento da permeabilidade à água pelo aumento do conteúdo de água da amostra à medida que o ensaio progride.

Dessa forma, embora não usual na área de tecnologia do concreto, o ideal para a modelagem do transporte de água em concretos em situações não saturadas é a obtenção, em separado, das suas curvas de retenção e de condutividade hidráulica. Essa separação, desde que as condições de contorno adequadas sejam adotadas, possibilita a modelagem do fluxo de água no interior do material, a qual pode ser utilizada, por exemplo, para a previsão do tempo de chegada do cloreto, proveniente do exterior, às armaduras do concreto armado, criando as condições adequadas para a deflagração de processos de corrosão.

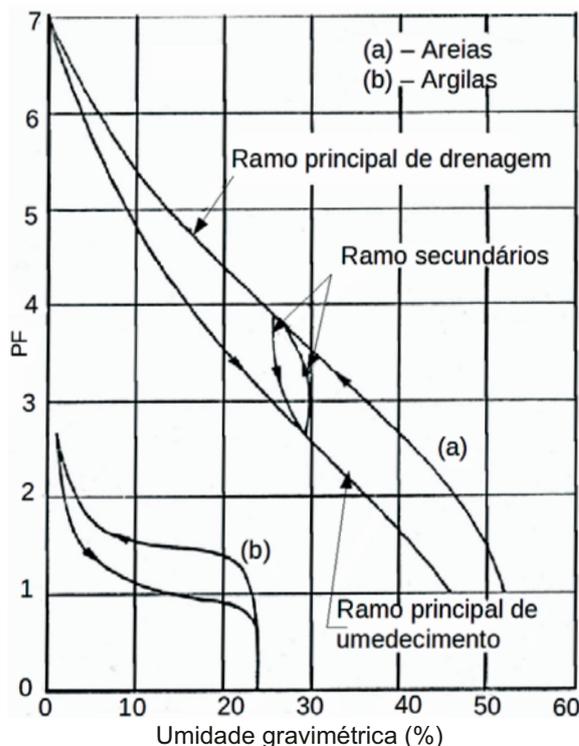
Conforme relatado anteriormente, quando o conteúdo de um líquido dentro de um meio poroso qualquer, expresso normalmente pela umidade gravimétrica ou volumétrica, se modifica, há uma mudança no estado de energia desse fluido e na maior ou menor facilidade com que este se move dentro dos interstícios que em que se encontra. À medida que o volume de água decresce, a “seção de fluido” nos vazios do material torna-se progressivamente menor. Desse modo, no processo de secagem, há um momento em que a continuidade entre as partículas do fluido pode ser interrompida, ponto em que a permeabilidade praticamente se anula. Assim, no caso de meios porosos não saturados, é comum haver referência a uma função de condutividade hidráulica, em que os valores de permeabilidade estão normalmente associados aos conteúdos do fluido ou ao seu estado de energia (dado normalmente pelo valor de sucção) dentro do meio. Embora não haja um claro consenso na literatura especializada, o termo permeabilidade aqui somente se referirá ao valor da função de condutividade hidráulica para uma condição de saturação do material.

Segundo relatado anteriormente, denomina-se de curva de retenção de água a relação existente entre o conteúdo de água do meio e o estado de energia da água intersticial. A figura 1 apresenta curvas de retenção típicas para solos arenosos e argilosos, de acordo com Presa [4]. Nesta figura, a sucção está representada no eixo das ordenadas, em função do logaritmo da carga hidráulica, em PF; e o conteúdo de água está representado no eixo das abscissas, em função da umidade gravimétrica. Esta é uma representação bastante utilizada em trabalhos relacionados com a física dos solos, embora neste caso a umidade volumétrica seja a mais utilizada.

Conforme se pode observar nesta figura, a curva de retenção é dependente da trajetória (de secagem, umedecimento ou mista) seguida durante o ensaio. Este fenômeno é denominado de histerese. O fenômeno da histerese é explicado por meio de diferentes causas, tais como: a geometria não uniforme dos poros intercomunicados por pequenas passagens, o efeito do ângulo de contato, que varia em função da trajetória seguida, a ocorrência de bolhas de ar aprisionadas, que influenciam a trajetória de umedecimento, e as variações de volume sofridas por expansão e retração. Assim, durante os processos de redistribuição de umidade, podem-se encontrar, para um mesmo solo, havendo condições de equilíbrio de sucção, diferentes valores de umidade, de acordo com Presa [4].

Não se encontrou na literatura a informação de que curvas de retenção para o concreto tenham sido determinadas a partir do método do papel-filtro e muito poucas são as curvas de retenção obtidas,

Figura 1 - Curva de retenção típica para solos arenosos e argilosos



Fonte: Presa (4).

independentemente do método empregado. No que tange aos modelos utilizados para a representação destas curvas, aqueles propostos por Van Genuchten [1], equação 1, e por Fredlund e Xing [5], equação 2, são os de uso mais corriqueiro na área de geotecnia. Nestas equações,  $\alpha$  ( $kPa^{-1}$ ),  $a$  ( $kPa$ ),  $n$  e  $m$  são parâmetros de ajuste;  $\theta_{sat}$  corresponde à umidade volumétrica saturada (igual à porosidade do meio);  $\theta_r$  à sua umidade residual (ponto em que a água intersticial se torna descontínua) e  $e$  corresponde à base do logaritmo neperiano ( $e = 2,718$ ). Ambas as equações apresentam similaridades como, por exemplo, valores de umidade ou de sucção, a partir dos quais são necessários grandes incrementos de sucção ou de energia para uma secagem adicional do meio. Estes são denominados valores de umidade ou de sucção residuais:  $\theta_r$  e  $\psi_r$ , respectivamente. A equação proposta por Van Genuchten [1] possui como grande vantagem a sua simplicidade; em compensação, aquela proposta por Fredlund e Xing [5] permite a representação da curva de retenção do meio até a sua completa secagem, o que, para estes autores, ocorre para um valor de sucção em torno de  $1 \times 10^6$  kPa.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_{sat} - \theta_r}{\left[1 + |\alpha \psi|^n\right]^m} \quad (1)$$

**Tabela 2 – Dados e composições das argamassas no estado fresco**

Traço	Proporções (cimento:areia), em massa	Relação água/cimento a/c	Consumo de cimento (kg/m³)	Índice de consistência (mm)	Porosidade (%)	Massa específica (kg/m³)
T-1A	1:4,167	0,650	368	167	28,5	1897
T-1B	1:3,690	0,650	397	223	29,9	1890
T-2A	1:3,377	0,550	441	162	27,0	1954
T-2B	1:2,968	0,550	476	230	27,6	1921
T-3A	1:2,577	0,450	552	161	23,0	2056
T-3B	1:2,247	0,450	592	232	25,0	2026

$$\theta = \theta_{sat} \cdot \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{\psi_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{1000.000}{\psi_r}\right)} \right] \left[ \frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right)} \right]^m \quad (2)$$

Como o conteúdo de água afeta a maior ou menor facilidade com que a água flui no meio, para que a modelagem do fluxo dessa substância no meio seja possível, é necessária a obtenção da curva de condutividade hidráulica do meio, na qual a permeabilidade é expressa como uma função da sucção ou do conteúdo do fluido de interesse. A partir do modelo de Mualem [6] para previsão de  $k(\theta)$ , Van Genuchten [1], adotando como simplificação

$m = 1 - \frac{1}{n}$ , propõe a seguinte equação para prever a função de condutividade hidráulica:

$$k(\theta) = k_{sat} \cdot \omega^p \left[ 1 - \left(1 - \omega^{\frac{1}{m}}\right)^m \right]^2 \quad (3)$$

onde:

$\omega$  é denominado de saturação efetiva do solo, sendo dado pela equação 4 (seguinte);

$k_{sat}$  é a condutividade hidráulica do meio poroso saturado;

$p$  é um parâmetro empírico, que foi estimado por Mualem [6] como

sendo aproximadamente igual a 0,5 para a maioria dos solos (não foram encontrados relatos do valor de  $p$  para concreto).

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \quad (4)$$

## 2. Materiais e métodos

### 2.1 Determinação experimental da curva de característica de sucção

Em função dos elevados valores de sucção obtidos em concretos e argamassas, o método utilizado para a determinação da curva de retenção correspondeu ao estabelecido pela norma ASTM D5298 [7], concernente ao uso do papel-filtro, pois este procedimento contempla faixa de medidas entre 30 a 30.000 kPa, conforme relatado por Silva [8].

As tabelas 2 e 3 apresentam os traços das argamassas e concretos fabricados nas duas etapas experimentais. Na primeira etapa, produziram-se argamassas a partir de misturas experimentais, tomando-se o cuidado de pesquisar, para uma determinada relação água/cimento, misturas com diferentes índices de consistência, (165 ± 5) mm e (225 ± 10) mm, e, consequentemente, com variados consumos de cimento. Assim, foram preparadas argamassas com relações água/cimento 0,45, 0,55 e 0,65. Para cada combinação de parâmetros acima, foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de argamassa de dimensões 50 mm x 100 mm, perfazendo um total de 24 corpos de prova (CP) de argamassa. Foi adotada

**Tabela 3 – Dados e composições dos concretos no estado fresco**

Traço	Proporções (cimento:areia), em massa	Relação água/cimento a/c	Consumo de cimento (kg/m³)	Índice de consistência (mm)	Porosidade (%)	Massa específica (kg/m³)
T- 4A	1:1,800:3,390	0,650	337	150	18,82	2192
T- 5A	1:1,368:2,870	0,550	405	145	18,26	2207
T- 6A	1:0,937:2,349	0,450	497	135	15,71	2276

a metodologia prescrita no procedimento normativo [9]. Depois de endurecidos, os CPs de cada traço foram cortados e, após o descarte de suas extremidades, deram origem a 8 fatias, que foram submetidas ao ensaio de sucção pelo método do papel-filtro.

Na segunda etapa, foram fabricados concretos com uma única consistência, abatimento de  $(140 \pm 20)$  mm, e relações água/cimento iguais a 0,45; 0,55 e 0,65. Para cada traço, foram moldados 4 corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm, perfazendo um total de 12 CPs. Os procedimentos de moldagem e cura obedeceram aos critérios da norma brasileira [10]. Os corpos de prova de cada traço foram cortados e, após o descarte de suas extremidades, deram origem a um total de 8 fatias, que foram submetidas ao ensaio de sucção pelo método do papel-filtro.

#### a) Descrição do ensaio

Foram utilizadas técnicas já empregadas em solos e o ensaio padronizado pela norma [11] para se desenvolver uma metodologia, que, a partir do uso do papel-filtro, determinasse a sucção de argamassas e de concretos. O método do papel-filtro baseia-se na capacidade que meios porosos têm de absorver ou perder certa quantidade de água (ou outro fluido) quando estão em contato direto ou indireto com esta substância, em um ambiente fechado, à temperatura e pressão constantes, até entrarem em equilíbrio de energia. Neste instante, os valores de umidade do meio poroso (concreto ou argamassa) e do papel-filtro são normalmente diferentes, porém ambos possuem a mesma sucção. O equilíbrio de energia é suposto atingido quando não se observam mais transferências de água da amostra para o papel-filtro (constância da massa dos elementos).

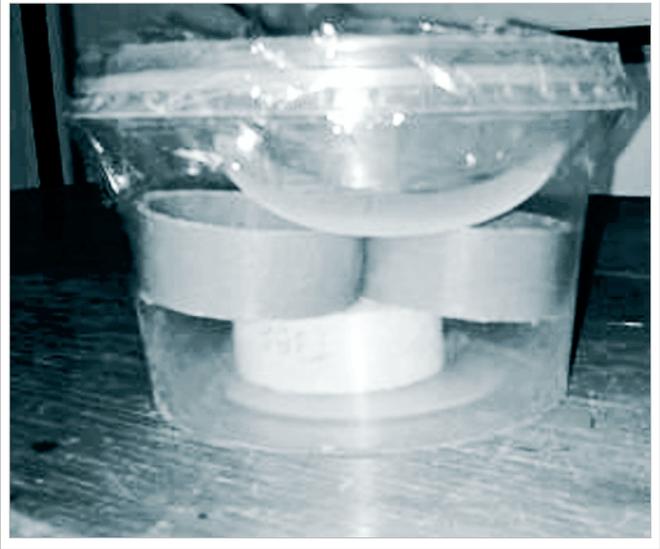
O ensaio pode ser feito mantendo-se ou não o contato entre o papel-filtro e a amostra. Quando não há contato, a troca de água entre os dois materiais porosos é feita com a água em forma de vapor. Neste caso, há permuta de água, mas não das substâncias dissolvidas na água intersticial da amostra, medindo-se a sucção total (osmótica + capilar + adsorção). A atmosfera formada dentro do recipiente atua como uma membrana semipermeável, que permite apenas a troca de água na forma de vapor, em se tratando de solutos não voláteis. No início do ensaio, o estado de energia da água na amostra, no papel-filtro e no ar do recipiente hermeticamente fechado, o qual é regulado pela sua umidade relativa, é diferente. São estes gradientes de energia que promovem o fluxo de água. Ao final do ensaio, os conteúdos de água na amostra, papel-filtro e no ar (umidade relativa), conduzem ao mesmo valor de sucção e o sistema entra em equilíbrio.

Quando o papel-filtro é posto em contato com a amostra, há troca de água na forma líquida e a sucção medida é a mátrica (capilaridade + adsorção), pois se permite o equilíbrio na concentração de solutos do meio.

Nesta pesquisa foram efetuadas medidas de sucção total (sem contato), tendo-se colocado o papel-filtro próximo do corpo de prova, a fim de se minimizar o volume do ar entre os dois materiais dentro do recipiente e diminuir o tempo necessário para o equilíbrio do sistema.

Outros cuidados também foram tomados devido à possibilidade de condensação de vapor dentro do recipiente, o que pode acarretar erros de medição no caso de gotas de água caírem sobre o papel. Também houve a preocupação em se evitar a contamina-

Figura 2 – Recipiente lacrado, provido de papel-filtro, anel de PVC e do corpo de prova



ção do papel-filtro por causa do contato com a mão do operador, motivo pelo qual o uso de luvas e pinças para o seu manuseio foi adotado. Devido à pequena massa dos papéis-filtros, uma balança com resolução de 0,001 g ou menor deve ser usada.

Antes da realização dos ensaios propriamente ditos, as amostras eram inicialmente saturadas e depois secadas ao ar até que atingissem o valor de umidade,  $w$ , desejado. Desta forma, em todos os ensaios seguiu-se uma trajetória de secagem, evitando-se os efeitos da histerese na curva de retenção. Após esta etapa, o conjunto, amostra e papel-filtro, era posto dentro do recipiente o qual era lacrado com o uso de fita adesiva (ver figura 2). Anéis de PVC foram utilizados para evitar o contato entre o papel-filtro e a amostra.

Ensaio preliminares foram realizados para verificar o tempo requerido para que o equilíbrio do sistema fosse atingido. Isto foi feito com a abertura periódica do recipiente e pesagem da amostra. Um tempo mínimo de 15 dias foi adotado. Durante este tempo, os recipientes lacrados eram mantidos em uma sala com controle de temperatura, na faixa de 20°C com variações de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , acondicionados dentro de uma caixa de isopor.

Depois de atingido o equilíbrio de sucção entre os componentes do recipiente, a amostra e o papel-filtro eram retirados para pesagem. Observou-se que, quando os papéis eram secados em estufa, antes de serem colocados dentro do recipiente junto com o corpo de prova, os resultados obtidos não eram compatíveis com os da curva de calibração obtida por Chandler e Gutierrez [11]. Desta forma, o uso de secagem prévia do papel-filtro deve ser evitado.

A pesagem do papel-filtro é um ponto crítico do ensaio. O recipiente deve ser aberto e, rapidamente, com o uso de pinças, proceder a remoção do papel-filtro, que é colocado dentro de uma cápsula com massa previamente determinada, sendo o conjunto então pesado em balança apropriada. Depois de pesado o conjunto é levado à estufa. A demora nesta operação pode permitir que o papel-filtro absorva água da atmosfera, o que interferirá nas medidas efetuadas.

É interessante também determinar a massa da cápsula após a secagem do papel-filtro. Isto ocorre porque a cápsula empregada pode possuir inicialmente pequenas porções de pó que acabam por serem parcialmente volatilizados na estufa, afetando as leituras efetuadas. A secagem da amostra de concreto ou argamassa pode ser feita de forma tradicional.

Após obter as massas do papel-filtro e da amostra, tanto antes como depois de sua inserção em estufa, e com o conhecimento prévio dos índices físicos dos materiais, pode-se determinar os seguintes parâmetros: a massa d' água contida no papel e no corpo de prova, a massa do papel-filtro seco e a massa do corpo de prova seco. De posse desses dados, com base nas relações de fases dos materiais, obtém-se o teor de umidade (%) do papel-filtro e, utilizando-se as equações 5 e 6 propostas por Chandler e Gutierrez [11], a sua sucção, a qual é assumida como igual à da amostra. Cada conjunto ensaiado fornece um ponto (umidade; sucção) da curva de retenção, lembrando-se que de cada traço de argamassa ou concreto foram ensaiadas 8 amostras (fatias). Assim sendo, como cada amostra possui um valor diferente de umidade,

pôde-se elaborar os gráficos de curva de retenção desses materiais.

$$S = 10^{(6,05 - 2,48 \log W)}, \text{ for } W > 47\% \tag{5}$$

$$S = 10^{(4,84 - 0,0622 \log W)}, \text{ for } W \leq 47\% \tag{6}$$

onde:

w é o teor de umidade, em %, do papel-filtro e S é a sua sucção, em kPa.

Neste trabalho, a equação empregada para o ajuste da curva de retenção correspondeu àquela proposta por Van Genuchten [1], equação 1. Nesta equação, o conteúdo de água das amostras é

**Tabela 4 - Resultados dos ensaios de sucção em corpos de prova de argamassa**

Dados				Teor de umidade gravimétrica do papel filtro (%)	Teor de umidade gravimétrica do corpo de prova (%)		Sucção (kPa)	Umidade volumétrica, $\theta$ , do corpo de prova (%)
					Antes do ensaio	Após o ensaio		
Características dos traços	a/c = 0,65	T-1A	(165±5) mm	13,32	3,22	3,10	10264,37	6,19
				25,36	7,26	6,83	1829,75	13,64
				28,41	8,13	7,69	1183,56	15,35
				34,26	9,09	8,48	511,55	16,94
		T-1B	(225±10) mm	10,71	3,10	3,01	14925,79	6,02
				19,02	5,58	5,26	4541,30	10,50
				23,61	7,20	6,75	2353,27	13,48
				25,99	8,14	7,65	1671,91	15,27
	a/c = 0,55	T-2A	(165±5) mm	35,63	10,45	9,80	420,41	19,57
				36,36	11,54	10,79	378,60	21,55
				11,98	3,14	3,03	12440,62	6,04
				12,23	3,11	3,03	12000,70	6,05
		T-2B	(225±10) mm	19,97	5,46	5,32	3963,11	10,62
				23,13	6,67	6,34	2520,18	12,65
				23,42	6,92	6,56	2416,33	13,11
				25,50	7,65	7,20	1794,32	14,38
	a/c = 0,45	T-3A	(165±5) mm	26,63	8,11	7,65	1592,45	15,29
				28,45	8,28	7,82	1175,57	15,62
				32,16	8,49	8,01	691,27	15,99
				34,81	9,45	8,93	472,80	17,83
		T-3B	(225±10) mm	13,34	3,78	3,68	10232,54	7,34
				22,37	6,35	5,98	2809,86	11,94
				27,69	8,10	7,66	1311,75	15,29
				32,41	8,53	8,05	666,92	16,08

Tabela 5 - Resultados dos ensaios de sucção em corpos de prova de concreto

Dados				Teor de umidade gravimétrica do papel filtro (%)	Teor de umidade gravimétrica do corpo de prova (%)		Sucção	Umidade volumétrica, $\theta$ , do corpo de prova (%)
					Antes do ensaio	Após o ensaio		
Características dos traços	a/c = 0,65	T-4A	(140 ± 20) mm	28,17	4,65	4,54	1223,89	10,23
				47,07	7,36	7,16	79,73	16,12
				39,22	7,16	6,96	251,53	15,67
		T-5A		21,90	4,71	4,54	3002,78	10,22
				41,67	7,26	7,04	177,15	15,85
				38,22	6,00	5,72	290,36	12,88
	T-6A	35,74		6,72	6,45	414,17	14,53	
		38,21		6,04	5,89	290,73	13,27	
		20,57		5,29	5,20	3637,87	11,72	
	a/c = 0,45	T-6A		48,64	7,63	6,79	73,49	15,30
				35,41	6,51	6,18	433,80	13,93
				33,13	6,19	6,04	601,87	13,60

expresso em termos de umidade volumétrica,  $\theta$ , que corresponde a razão entre o volume de água e o volume total das mesmas. Portanto, foi necessário utilizar os valores de massa específica dos materiais (argamassa e concreto) para transformar os valores de umidade gravimétrica em umidade volumétrica.

### 3. Resultados obtidos e análises

Os resultados dos ensaios de sucção total pelo método do papel-filtro efetuados em amostras de argamassa e de concreto encontram-se nas tabelas 4 e 5, respectivamente. Nessas tabelas, pode-se verificar os valores de umidade final de cada material e o valor de sucção de equilíbrio calculado com o uso das equações

5 e 6, a partir da umidade final do papel-filtro. Cabe destacar que foram apenas indicados os valores de ensaios considerados válidos.

As figuras 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para as curvas de retenção de água para as amostras de argamassa e de concreto, respectivamente. Conforme se pode observar, principalmente para o caso dos corpos de prova de argamassa, os resultados obtidos se encontram bastante próximos. Isto indica que o uso de diferentes valores de a/c não foi capaz de alterar a distribuição de microporos do meio poroso. No caso dos corpos de prova de concreto, embora os resultados obtidos mostrem um nível de dispersão maior, eles ainda se encontram próximos um do outro.

Figura 3 - Curvas de retenção obtidas para amostras de argamassa fabricadas a partir dos traços T-1A, T-1B, T-2A, T-2B e T-3A

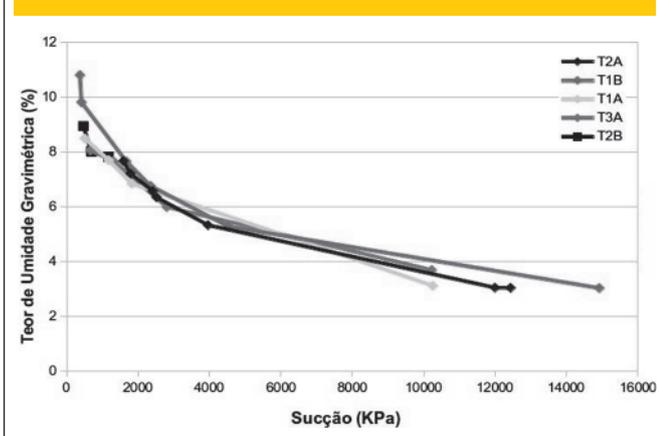
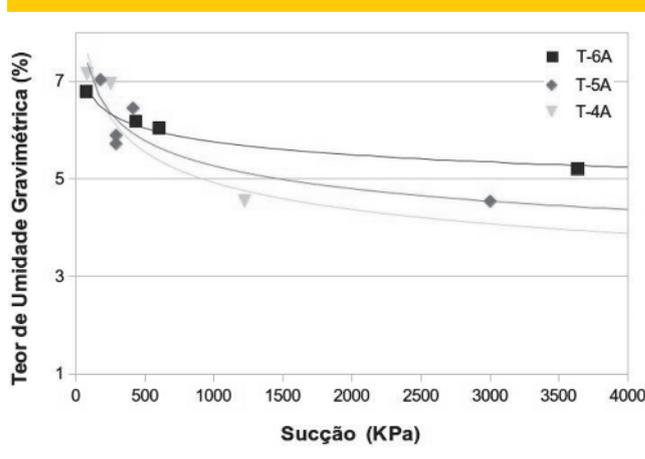
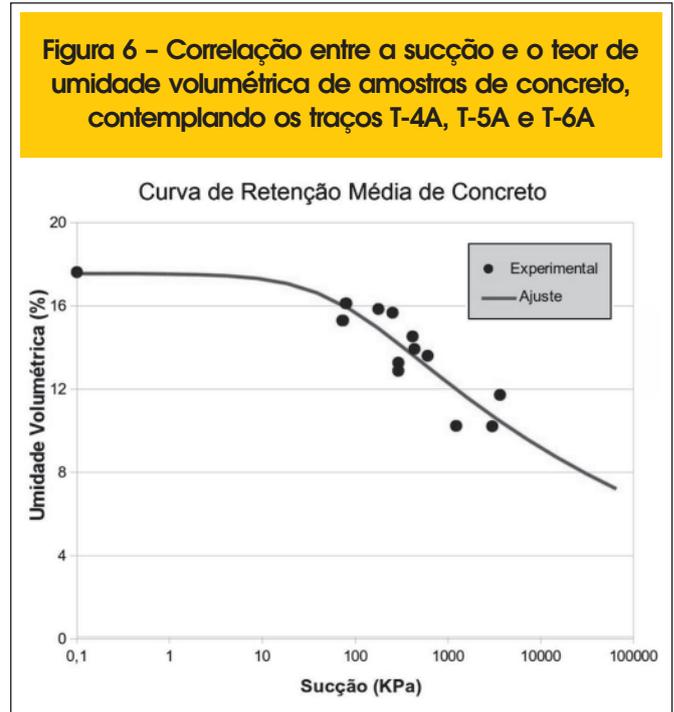
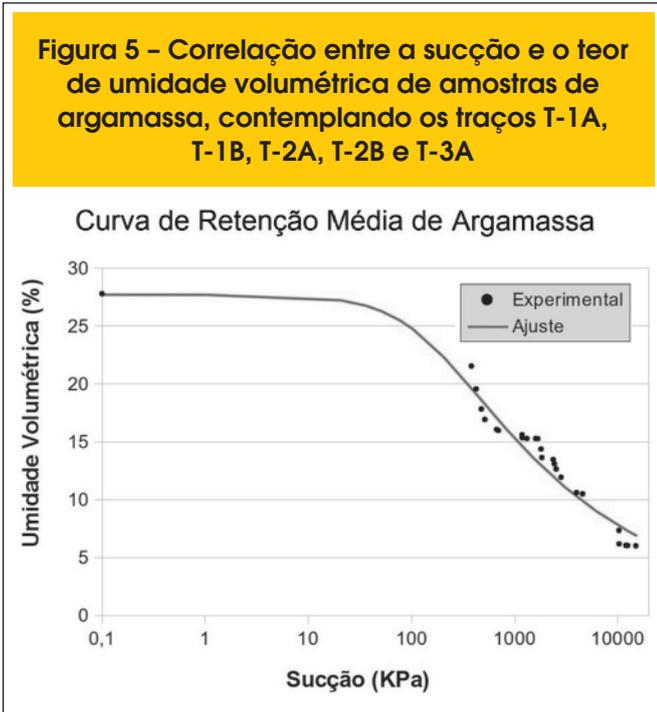


Figura 4 - Curvas de retenção obtidas para amostras de concreto fabricadas a partir dos traços T-4A, T-5A e T-6A





Desse modo, não fica evidenciada a influência da relação água/cimento nesse caso. Kumar [12] utilizou-se da técnica de equilíbrio de vapor para determinar curvas de retenção de concretos fabricados com relações água-cimento iguais a 0,40, 0,50 e 0,60. Os resultados indicam que perfis semelhantes foram obtidos para todas as três misturas de concreto.

As figuras 5 e 6 mostram os resultados obtidos ajustados ao modelo proposto por Van Genuchten [1]. A tabela 6 apresenta um resumo dos parâmetros desse modelo, obtidos pelo uso do método dos mínimos quadrados. A planilha da suíte do LibreOffice® foi utilizada na realização dos ajustes.

Figura 5 – Correlação entre a sucção e o teor de umidade volumétrica de amostras de argamassa, contemplando os traços T-1A, T-1B, T-2A, T-2B e T-3A

Hendrickx, Roels e Balen [13] executaram ensaios de sucção pelo método da placa de pressão, em argamassas de cal e de cimento.

As características desses materiais e os seus valores de umidade volumétrica na saturação ( $\theta_s$ ), umidade volumétrica residual ( $\theta_r$ ) e coeficiente de permeabilidade na saturação ( $k_{sat}$ ) encontram-se mencionados na tabela 7. Consta-se que os os valores de umidade volumétrica ( $\theta_s=0,30$  e  $\theta_r=0,050$ ) validam os resultados desses parâmetros obtidos em argamassas e apresentados na tabela 6.

Segundo Freitas, Torres e Guimarães [14], o desenvolvimento da curva de sucção depende da lei de distribuição, dos raios dos poros e da sua variação. Estes pesquisadores realizaram vários ensaios para caracterizar a degradação de edifícios portugueses em função da umidade ascensional proveniente do solo, que por capilaridade migra através dos materiais porosos que constituem as paredes e pavimentos dessas construções. A figura 7 mostra curvas de retenção obtidas para diferentes materiais (concreto, argamassa, gesso e poliuretano expandido).

**Tabela 6 – Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água, segundo o modelo de Van Genutchen (1), para argamassas e concretos**

Parâmetros	Argamassas (T-1A, T-1B, T-2A, T-2B e T-3A)	Concretos (T-4A, T-5A e T-6A)
$\theta_s$ ( $m^3 \cdot m^{-3}$ )	0,27799	0,17622
$\theta_r$ ( $m^3 \cdot m^{-3}$ )	0	0
n	1,29634	1,068775
m	0,22859	0,06434
$\alpha$ ( $kPa^{-1}$ )	0,007066691	0,0156045743
R <sup>2</sup>	94,88%	80,84%

**Tabela 7 – Composição, propriedades e parâmetros de sucção de argamassas elaboradas com cal ou cimento**

Dados	Argamassas	
	Com cal	Com cimento
Aglomerante/areia (kg/kg)	0,112	0,218
Água/aglomerante (kg/kg)	2,016	0,907
Superfície específica do aglomerante (m <sup>2</sup> /g)	12,0	1,30
Diâmetro médio dos grãos do aglomerante (µm)	6,03	12,50
$\theta_s$ (m <sup>3</sup> · m <sup>-3</sup> )	0,33	0,30
$\theta_r$ (m <sup>3</sup> · m <sup>-3</sup> )	0,130	0,050
$k_{scat}$ (m/s)	$2,27 \times 10^{-7}$	$6,17 \times 10^{-7}$

Fonte: Hendrickx, Roels e Balen (14).

#### 4. Conclusões

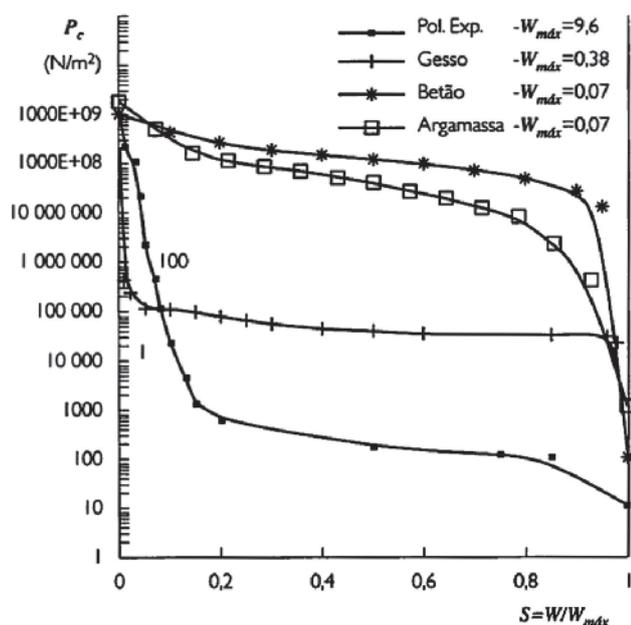
Os resultados dos ensaios de sucção total, realizados pelo método do papel-filtro, em corpos de prova de argamassa e de concreto, não evidenciaram de forma significativa a influência da relação água/cimento nesse fenômeno. Considerando a umidade volumétrica de 27,80% para as argamassas e de 17,62% para o concreto, os valores mínimos de sucção calculados para esses materiais foram 50 Pa e 100 Pa, respectivamente. Em relação aos parâme-

tros de ajuste das curvas de retenção desses materiais, quando comparados aos obtidos em solos, observa-se uma grande disparidade, decorrente das características distintas existentes em suas porosidades. De uma forma geral, as curvas de retenção obtidas em concretos devem se aproximar daquelas obtidas para solos muito argilosos, capazes de reter volumes apreciáveis de água mesmo para altos valores de sucção (ver figura 1).

Apesar da muito pequena quantidade de dados disponível na literatura, os valores obtidos de umidade volumétrica na saturação e residual ( $\theta_s=0,30$  e  $\theta_r=0,050$ ) por outros autores se encontram próximos dos valores obtidos neste trabalho.

Assim, constata-se que foi empregada uma técnica não usual com sucesso, pois os valores encontrados foram satisfatórios, motivo pelo qual se pode recomendar o emprego desses dados em simulações mais adequadas, utilizando-se condições de contorno específicas.

**Figura 7 – Curvas de retenção obtidas para diferentes materiais porosos**



Fonte: Freitas, Torres e Guimarães (14).

#### 5. Referências

- [1] VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science, Society of America Journal, Madison, WI, 44:5, p. 892-898, 1980.
- [2] MACHADO, S. L.; PRESA, E. P. Current Tendencies for Unsaturated Soils in Brazil. ECOS do NSAT 2007. In: BRAZILIAN CONGRESS FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING - COBRAMSEG, 2008, Búzios, RJ. Anais... Vol., p.231-250.
- [3] BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL NORMS. NBR 9779: mortar and harden concrete–water absorption determination through capillarity. Rio de Janeiro, 1995. 2 p.
- [4] PRESA, E. P. Expansive Clay misshape under controlled suction. 1982. Doctoral Thesis– Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- [5] FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, 31- 4, p. 521-532, 1994.
- [6] MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic con-

- ductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12-3, p. 513-522, 1976.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. ASTM D5298 -10: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper. In: \_\_\_\_\_. *Annual Book of ASTM Standards*. vol. 15.09. Philadelphia, 2010.
- [8] SILVA, A. M. Water Retention Curve for Brazilian soils. 2005. Thesis (Civil Engineering Master's Program) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Estadual de São Paulo, USP, São Carlos, SP.
- [9] BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL NORMS. NBR 7215: Portland Cement–resistance and compression determination. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.
- [10] BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL NORMS. NBR 5738: Cylindrical test subject's molding and curing; procedure. Rio de Janeiro, 2008. 6 p.
- [11] CHANDLER, R. J.; GUTIERREZ, C.I. (1986). The Filter-Paper Method of Suction Measurement. *Géotechnique*, Vol. 36, N°2, p. 265-268.
- [12] KUMAR, A. Water flow and transport of chloride in unsaturated concrete. A thesis submitted to the college of graduate studies and research in partial fulfilment the degree of master of science in the Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2010.
- [13] HENDRICKX, R.; ROELS, S.; BALEN, K.V. Measuring the water capacity and transfer properties of fresh mortar. *Cement and Concrete Research*, New York, v. 40, p.1650-1655, 2010.
- [14] FREITAS, V. P; TORRES, M. I; GUIMARÃES, A. S. *Humidade Ascensional*. Porto: FEUP, 2008. 106 p.