

Higroscopicidade e Capilaridade nos Materiais de Construção.

P.C. Philippi, C.P. Fernandes, P.R. Yunes
Laboratório de Meios Porosos e Prop. Termofísicas de Materiais
Grupo de Análise térmica de Ambientes
Universidade Federal de Santa Catarina - CxP 476 Florianópolis SC

Resumo

Os materiais de construção são, usualmente, higroscópios, sendo capazes de fixar o vapor d'água presente e/ou produzido nos recintos habitados. São dessa forma, elementos que contribuem para regular as condições de conforto e higiene nestes recintos. A umidade fixada por esses materiais constitui, por outro lado, um modificador importante das suas características térmicas, também contribuindo para reduzir a durabilidade. Propiciando a formação e desenvolvimento de fungos e alterando as características estéticas dos paramentos. O presente trabalho apresenta as isotermas de equilíbrio com o vapor d'água e os valores da permeabilidade relativa para alguns materiais comuns das edificações, comparando-os entre si e discutindo a problemática associada as suas características higroscópicas do ponto de vista utilização na construção.

Abstract

Building materials; are, usually, hygroscopic, fixing the water vapor present and/or produced in rooms. They, thus, contribute to regulate the, hygienic and comfort conditions related human living. In addition, moisture adsorbed by these materials contributes to modify their thermal properties, reducing, the durability and allowing to mold growth and reduction of aesthetic patterns. This paper presents the equilibrium isotherms and the values of the relative permeability for some common materials found in building construction.

Introdução

Os materiais usualmente empregados nas edificações, apresentam uma estrutura porosa, sendo capazes de fixar e transferir a umidade tanto na fase líquida quanto na fase gasosa. Quando na fase líquida, a umidade é fixada e transferida na estrutura porosa através de processos ditos de *capilaridade*. É desta forma que a umidade do solo e das chuvas se introduz nos paramentos porosos das edificações. Quando na gasosa, a umidade se utiliza dos processos de *adsorção física* e *condensação capilar* para se fixar nos poros superficiais dos materiais, sendo posteriormente transferida para o interior dos mesmos através de processos envolvendo a transferência de líquido por *capilaridade* e de vapor por *difusão*. É desta forma que o vapor produzido nas cozinhas, salas de banho e saunas é incorporado sob a forma de água líquida na estrutura porosa dos materiais do envoltório. Sem procurar definições rigorosas, denomina-se *higroscopicidade* ao efeito de aumento do conteúdo de líquido dos materiais quando os mesmos são colocados em contato com o vapor d'água. Por outro lado, a *capilaridade* caracterizaria esse mesmo efeito, quando os materiais são colocados em contato com a água na fase líquida.

Desse modo, costuma-se, historicamente, distinguir os dois mecanismos tratando-se-os separadamente. Surgiram, dessa forma., vários conceitos derivados dessa distinção fenomenológica como o da *sortividade*, [1,2] associado à taxa em Kg/s com a qual um material incorpora água líquida em sua estrutura e objeto de ensaios normalizados, e o conceito de *permeabilidade ao vapor*, originário do estudo de materiais de isolamento térmico e que descreve a taxa com a qual o vapor d'água é transferido através de um material poroso quando uma das superfícies está em equilíbrio com uma atmosfera a 100(50)% de umidade relativa e a outra superfície está em equilíbrio com uma atmosfera a 50(0)% de umidade relativa (British Standards, BS 4370 Part 2, 1973 e American Society for Testing Materials, ASTM B96-80, 1973).

Não existe, todavia, uma distinção clara entre os mecanismos de fixação e transferência de líquido e vapor, num material poroso. De fato, o vapor adsorvido em fase líquida na superfície do material será transferido para o interior tanto por mecanismos de difusão quanto por mecanismos de capilaridade (mantendo-se na fase líquida). Há uma ocorrência entre os mecanismos de transporte por *difusão* e por *capilaridade*, sendo

muito difícil separar os dois efeitos em virtude dos processos de mudança de fase que ocorrem nas interfaces vapor-líquido.

A Figura-1 ilustra os mecanismos físicos possíveis de ocorrer na estrutura porosa de um material quando o mesmo é submetido a um gradiente de pressão de vapor entre as suas superfícies externas. A existência de poros condensáveis, com diâmetros inferiores a 2000 angstroms (regiões A e B da Figura-1) propicia a formação de ilhas de líquido, constituídas por poros condensáveis conectados entre si (eventualmente, formando um sistema contínuo ligando as duas superfícies externas do material) e preenchidas por líquido, resultante da condensação do vapor. Essas ilhas não são inertes, não constituindo barreiras para a passagem do vapor: pelo contrário, as mesmas intensificam, significativamente, o processo de transferência, uma vez que a sua resistência hidráulica é muito pequena, em relação à resistência hidráulica que a mesma teria caso estivesse preenchida com o vapor.

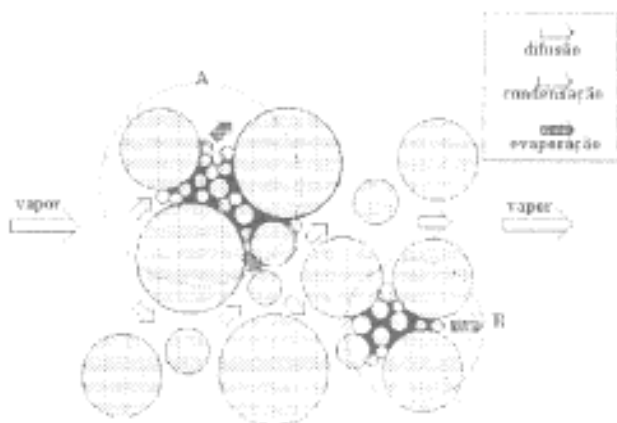


Figura 1 Transferência de vapor através de um material poroso quando as duas superfícies externas estão em contato com duas atmosferas a diferentes umidades relativas.

Materiais de construção são usualmente caracterizados por possuírem uma gama bastante extensa de diâmetros de poros que variam entre algumas dezenas de angstroms a vários microns. Este é o caso dos materiais a base de aglomerantes hidráulicos (argamassas e concretos), assim como também é o caso para os materiais cerâmicos: tijolos telhas de barro. A presença de poros condensáveis, de pequenos diâmetros, em grande proporção:

- i)-- Caracteriza as propriedades, de higroscopicidade desses materiais;
- ii)- Modifica, significativamente, as suas características de permeabilidade ao vapor, que passa a depender do conteúdo de umidade presente em seus poros.

De fato, o conceito de permeabilidade ao vapor, normalizado pela American Society for Testing Materials (ASTM E96-80~ 1973) teve a sua origem no estudo de materiais de isolamento térmico, com grandes poros, onde o fenômeno da condensação é muito pouco importante: desta forma é a estrutura sólida destes materiais a única fonte de modificação ao de difusão do vapor, que fica condicionado ao volume relativo de vazios presente na estrutura e a configuração espacial desses vazios(topologia).

Van der Kooij, [3], em sua tese de doutoramento, estudou a influência do processo de transferência em fase líquida sobre a permeabilidade ao vapor em materiais com uma proporção considerável de, poros suscetíveis de condensação.

Galbraith e MacLean, [4], mediram a influência do conteúdo de umidade sobre a permeabilidade ao vapor, submetendo as superfícies externas opostas das amostras ao contato com atmosferas em equilíbrio com soluções salinas diferentes. Utilizando pares de soluções salinas próprias à produção de atmosferas com umidades relativas muito próximas, tornaram possível a determinação da permeabilidade, diferencial, obtida pelos autores em função da umidade relativa, De fato, presentemente, a utilização das normas correntes para a medição da permeabilidade ao vapor de materiais higroscópicos é motivo de várias críticas, [5]

O presente trabalho apresenta uma análise dos processo, de fixação e, transferência do vapor-d'água em materiais de construção, quando estes apresentam uma proporção significativa de poros condensáveis. As isotermas de equilíbrio e a permeabilidade relativa são apresentadas para alguns materiais mais importantes.

2. Higroscopicidade

A Figura-2 apresenta um esquema do dispositivo experimental

utilizado para a obtenção das isotermas de equilíbrio de materiais higroscópicos,

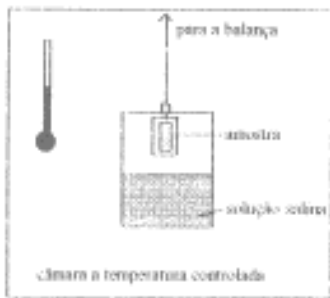


Figura 2 Esquema do dispositivo experimental para a determinação das isotermas de equilíbrio

A amostra é colocada numa atmosfera em equilíbrio com uma solução salina saturada com corpo de fundo, cuja função é manter a umidade relativa constante. A Tabela-1 apresenta alguns sais utilizados e os valores da umidade relativa de equilíbrio para a temperatura de 30°C de acordo com a norma AINOR NP X- 14/014. A amostra é previamente seca em estufa para ensaios de adsorção e previamente umidificada em ensaios de dessorção. Maiores detalhes quanto aos cuidados relativos à preparação das amostras e aos ensaios podem ser encontrados em [6,7]

Tabela 1: Valores da umidade relativa h para diferentes sais

Solução	h (%)
Cloreto de Lítio	12
Acetato de potássio	22
Cloreto de Magnésio	33
Carbonato de Potássio	44
Nitrato de Amônia	59
Cloreto de Sódio	75
Cloreto de Potássio	83
Nitrato de Potássio	93
Sulfato de Potássio	98

A figura-3 apresenta as isotermas de equilíbrio de uma argamassa de cal e cimento (8 partes de areia fina, 2 partes de cal e 1 parte de cimento, em massa), usada como argamassa de revestimento (reboco) em edificações, obtidas a 50°C. A porosidade medida para a argamassa foi de 0,304.

Algumas conclusões podem ser obtidas dessa figura:

- Quando submetida a valores crescentes de umidade relativa, a argamassa fixa umidade, por adsorção do

vapor d'água podendo reter água líquida, a 96%UR, até cerca de 12% do seu volume poroso. Equivalente à 21,6 cm³ por cada Kg de argamassa (valores de equilíbrio a 30°C).

- Em dessorção, o conteúdo retido de líquido é sempre superior ao equivalente em adsorção. Deste modo, caso a argamassa tenha, previamente sofrido um processo de umidificação por contato com a água na fase líquida (por, e.g. exposição à chuvas), a mesma conseguirá reter, a 96%UR, cerca de 37% do seu volume poroso em líquido (equivalente a 66,4 cm³ por cada Kg de argamassa ou 3X o que a mesma retém em adsorção). Isto é: é mais difícil secar a argamassa do que umidificá-la.

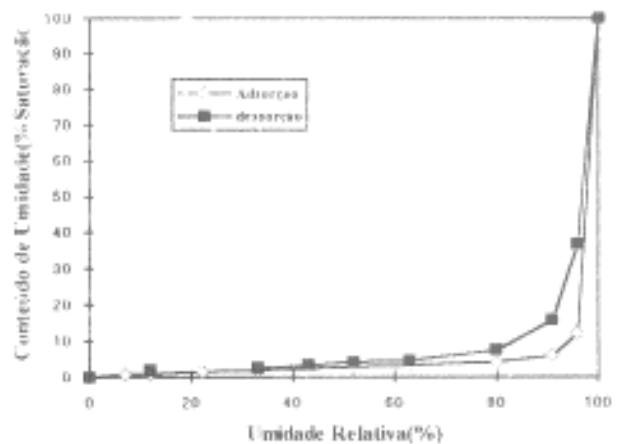


Figura 3 Isotermas de equilíbrio de uma argamassa de cal e cimento a 30°C

De fato, todos os materiais porosos se comportam em relação à umidade, de maneira histerética. Estudos recentes mostraram que a histerese é função basicamente, da acessibilidade espacial dos poros.

A Figura-4 mostra a influência da temperatura sobre as isotermas de adsorção da argamassa. Como se observa, uma redução na temperatura aumenta as características de fixação de umidade do material em função do aumento promovido nos

valores da tensão superficial.

Todavia este efeito é muito pequeno,

Observe, todavia, que a Figura-4 apresenta nas abcissas, a umidade relativa como variável independente e que o verdadeiro potencial para a, fixação de umidade numa parede recoberta por este material é a pressão parcial de vapor p_v . Na superfície da parede, a pressão parcial do vapor se escreve,

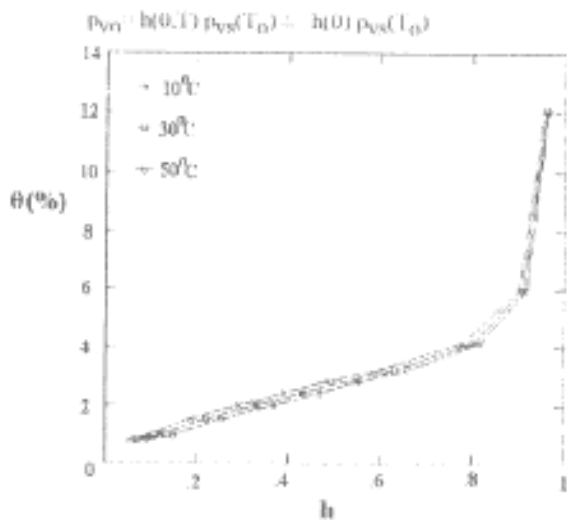


Figura 4 Influência da temperatura sobre as isotermas de adsorção da argamassa de cal e cimento.

onde T_0 é a temperatura superficial da parede, h é a umidade relativa, θ é o conteúdo de umidade, e, $p_{vs}(T)$ corresponde à pressão de vapor saturado à temperatura T .

Deste modo, a temperatura superficial da parede, T_0 influirá sobre o potencial de fixação de umidade, sobretudo em função da dependência da pressão de vapor saturado em relação à temperatura.

Essa dependência é muito importante, quando se considera o processo de evaporação/fixação do vapor d'água pelas superfícies dos paramentos externos das edificações. Com efeito, durante o período noturno, essas superfícies esfriam, perdendo calor para a atmosfera por radiação infravermelha. Com isso, decai a pressão parcial do vapor, em equilíbrio com superfície do paramento, favorecendo o processo de fixação do vapor pelos poros da superfície, na forma de água líquida (Figura-5). Durante, o período diurno, o processo ocorre de maneira inversa: a

absorção de radiação solar, pela manhã, aquece a superfície, aumentando T_0 , e, em conseqüência, p_{v0} , favorecendo a evaporação da umidade que se acumulou nos poros do paramento, durante a noite.

Bueno et al, [8], discutem alguma conseqüências práticas associadas a influência da umidade sobre o comportamento térmico dos paramentos das edificações,

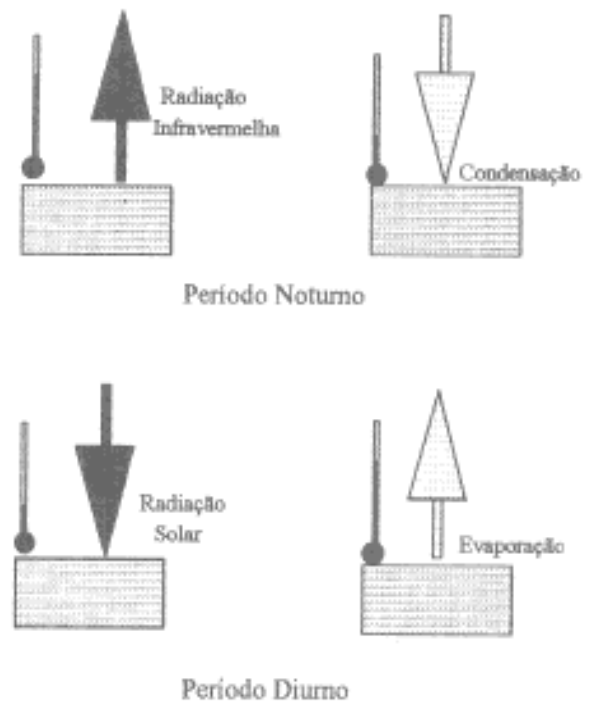


Figura 5 Fixação/evaporação & umidade em elementos porosos.

3. Efeito da Permeabilidade Relativa.

A observação cotidiana mostra que alguns materiais porosos (como a ardósia), orvalham, quando submetidos a um processo de esfriamento radiante, durante a noite, enquanto que, outros materiais (como a telha de barro), não orvalham, quando submetidos às mesmas condições (Figura-6). Quais as razões dessa diferença?

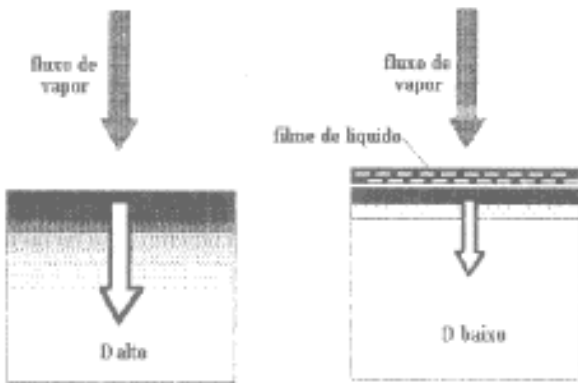


Figura 6 Influência da Permeabilidade Relativa

Os materiais opõem uma resistência à transferência de fluidos determinada, fundamentalmente, pela distribuição de poros e pelo conteúdo de umidade. Seja h_i a umidade relativa crítica, correspondente ao preenchimento de um poro de diâmetro D_i por líquido, i.e. Philippi. [9],

$$h_i = e^{-\frac{4\sigma M_l}{RT D_i p_l}} \quad (1)$$

onde R = constante geral dos gases. σ = tensão superficial da água, M_l , p_l a massa molecular e, a massa específica da água, respectivamente, e T é a temperatura. Quando $h < h_i$ o poro está vazio, apresentando em seu interior apenas o vapor d'água em equilíbrio com uma camada de líquido adsorvida, cuja espessura nunca é maior que algumas dezenas de angstrom. Quando $h = h_i$ o poro se preenche com o líquido resultante da condensação do vapor, uma vez que passa a constituir um sistema termodinamicamente instável.

Desse modo, enquanto a umidade relativa h se mantiver abaixo de h_i não haverá condensação, o transporte de fluidos ocorrendo apenas na fase gasosa. Para cada poro, a resistência que o mesmo oferecerá a passagem do vapor será dada por.

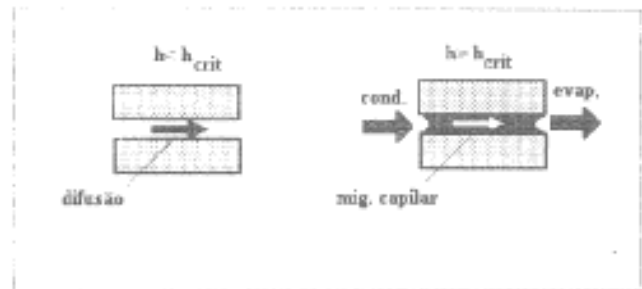
$$R_i = \left(\frac{RT}{P} \right)^2 \frac{4L_i}{\pi D_i^2 M_l M_a D} \quad (2)$$

onde L_i corresponde ao comprimento do cilindro que representa o poro. O sub-índice "a" denota as propriedades do ar e "l" as

propriedades da água P é a pressão total do ar e ϕ corresponde a difusividade do vapor d'água no ar.

Tabela 2 Resistências Hidráulicas R_g e R_l de um poro cilíndrico com diâmetro D e comprimento $L(=D)$. O valor de h corresponde ao valor crítico, acima do qual ocorre condensação.

D (Angstrom)	L (Angstrom)	h_{crit}	$R_g(SI)$	$R_l(SI)$
100	100	0.8070695	$6.06E+12$	$2.09E+12$
200	200	0.8983704	$3.03E+12$	$2.91E+11$
500	500	0.9580368	$1.21E+12$	$1.99E+10$
1000	1000	0.9787935	$6.06E+11$	$2.54E+09$
2000	2000	0.9895399	$3.03E+11$	$3.20E+08$
10000	10000	0.9978588	$6.06E+10$	$2.59E+06$
100000	100000	0.9997857	$6.06E+09$	$2.59E+03$



Quando $h = h_i$ o poro de diâmetro D_i se enche de líquido: o vapor condensa na extremidade anterior do poro e o líquido evapora na extremidade superior do poro, ocorrendo uma transferência em fase líquida através do poro, cuja vazão é dada por (lei de Poiseuille):

$$m_i = \frac{\pi D_i^4}{128 \mu_l} \frac{\Delta p_i}{L_i} \quad (3)$$

Mas p_l está relacionada com a umidade relativa, h , através da equação de Kelvin,

$$p_l = P + \frac{\rho_l RT}{M_l} \ln h \quad (4)$$

e, deste modo, a vazão de líquido pode ser escrita em termos dos valores da umidade relativa, em equilíbrio com cada uma das faces do poro i ,

$$m_1 = \beta_1^2 \frac{\pi D_1^4}{128 \mu L_1} \frac{9RT}{M_1 h} \Delta h \quad (5)$$

podendo-se escrever a resistência hidráulica, na forma,

$$R = \frac{128 \mu L_1 M_1 h}{\pi D_1^4 9RT \beta_1^2} \quad (6)$$

A tabela 2 fornece os valores das resistências hidráulicas R_g calculada pela Eq.-(2), quando $h < h_{crit}$, e R_I , calculada com a Eq.-(6), quando $h > h_{crit}$. Observa-se que a condensação de vapor, provocando o preenchimento dos poros por líquido acarreta um aumento bastante significativo na taxa de transferência de umidade através dos poros, que é multiplicada por 100 nos poros de 500 Angstroms de diâmetro e por 10000 nos poros de 1 μm de diâmetro

Retornando agora à Fig.-6:

o A pressão parcial do vapor em equilíbrio com a superfície externa dos paramentos é, durante a noite, inferior à pressão parcial do vapor presente no ar atmosférico, mas como a temperatura dessas superfícies cai muito, devido a radiação noturna a umidade relativa h é muito próximo de 1, junto à superfície,

ii) Isso faz com que os poros superficiais se preencham com líquido condensado, de, acordo com a Tabela 2. quando $h > h_{crit}$,

iii) O líquido condensado e por sua vez, a) transferido para o interior do material por capilaridade e b) utilizado com uma ponte, de menor resistência hidráulica de acordo com a Tabela 2, para o transporte de vapor

Isso explica o mecanismo de preenchimento de materiais porosos por líquido, contudo não explica as diferenças observadas nas cinéticas de adsorção entre os materiais usados na construção.

Quando a distribuição de poros no material é tal que a taxa de transporte de umidade pelos mecanismos acima descritos, no interior do material, é superior à taxa de condensação, não há produção de orvalho na superfície. Caso contrário forma-se um

filme, de líquido na superfície do material. Desse modo, materiais com uma fração importante de poros finos (como a ardósia) orvalham com mais facilidade, em relação a um material com uma fração predominante de poros grossos (como a telha de barro) Todavia, ainda que pelos mesmos motivos, os primeiros são mais higroscópicos que os segundos, no sentido que fixam uma quantidade em massa de água líquida mais importante que os segundos quando em equilíbrio com atmosferas mantidas à mesma umidade relativa. Isto é: ainda que mais ávidos por umidade, os materiais higroscópicos apresentam uma cinética de adsorção mais lenta. A mesma Tabela-2, acima, indica essa diferença quando se compara as resistências hidráulicas de poros com diferentes diâmetros: quando se passa de poros de 200 Angstroms para poros de 1000 Angstroms a resistência hidráulica é reduzida por um fator de 10 (tanto em fase líquida quanto em fase vapor).

Em suma, materiais com uma distribuição importante de poros finos.

- são mais higroscópicos;
- apresentam uma menor permeabilidade relativa, com uma cinética de, adsorção mais lenta;
- orvalham mais facilmente.

Desse modo, é muito importante conhecer (eventualmente: controlar) a distribuição em volume dos poros dos materiais: isso permite inferir de maneira bastante precisa sobre as suas características de retenção e transporte de umidade.

A Figura-8 mostra a distribuição acumulada em volume de poros, obtida para uma argamassa de cal e cimento. Os dados foram obtidos, usando-se

- as isotermas de adsorção, para poros com diâmetros inferiores a 2000 Angstroms;
- a microscopia eletrônica para diâmetros superiores a 2000 Angstroms.

Do ponto de vista macroscópico, pode-se definir uma propriedade dos materiais porosos que globalize as informações associadas aos poros a nível de um volume elementar (i.e. um volume suficientemente grande para conter um número muito grande poros mas, também, suficientemente pequeno em relação às dimensões representativas

do material em estudo).

Trata-se da condutividade hidráulica K [m/s], definida através da seguinte expressão:

$$j = -\rho_l K \nabla \Psi \quad (7)$$

onde Ψ é o potencial de retenção do líquido [m], ρ_l é a massa específica da água e, j , a densidade de fluxo de umidade [Kg/(m²s)].

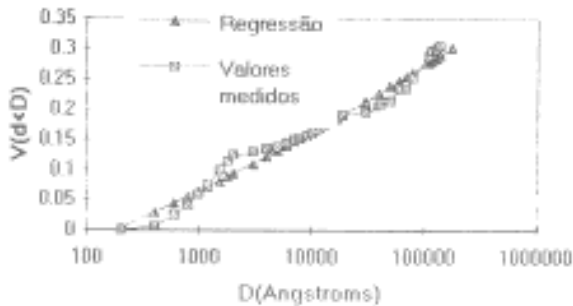


Figura 8. Distribuição acumulada em volume de poros para uma argamassa de cal e cimento.

Para que o formalismo macroscópico possa ser usado é necessário que se admita a hipótese de equilíbrio local: cada volume elementar representativo está em equilíbrio. Nessas condições, o potencial de retenção Ψ pode ser interpretado como o potencial de retenção correspondente ao maior poro do volume elementar representativo preenchido por líquido (Fig. 9).



Figura 9 O potencial de retenção para o V.E.R. se escreve $\Psi \approx -4\sigma/D_i$.

Desse modo, a distribuição de poros, Figura-8, pode ser usada para calcular o potencial de retenção para cada conteúdo de umidade, i.e. para cada volume de poros V_i com diâmetros inferiores a um determinado valor D_i ¹

¹ De fato o volume de poros com $D \leq D_i$, V_i , só corresponde ao comedido de líquido retido em processos de umidificação, quando a disposição geométrica dos poros não interfere sobre a distribuição de líquido retido.

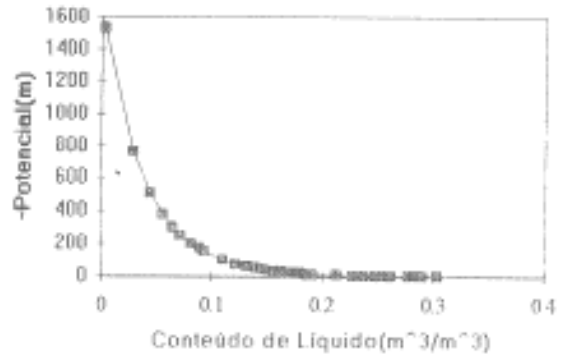


Figura 10 Relação funcional $-\Psi = f(\theta_1)$

A Figura-10 mostra a relação entre o potencial Ψ e o conteúdo de líquido θ_1 para uma argamassa de cal e cimento,

O conhecimento da relação funcional $\Psi=f(\theta)$, permite, por outro lado, reescrever a equação para a densidade de fluxo de massa acima,

$$j = -\rho_l \left(K \frac{\partial \Psi}{\partial \theta_1} \right) \nabla \theta_1 = -\rho_l D \nabla \theta_1 \quad (8)$$

onde D é a difusividade de massa [m²/s], constituindo um parâmetro possível de ser facilmente medido em experimentos de embebição. A Figura -11 mostra a dependência de D em relação a θ_1 , obtida experimentalmente para a argamassa de cal e cimento, a 25°C [6], e a Figura-12 mostra a dependência funcional de $K=K(\theta_1)$ obtida usando:

$$K = \frac{D}{\partial \Psi / \partial \theta_1} \quad (9)$$

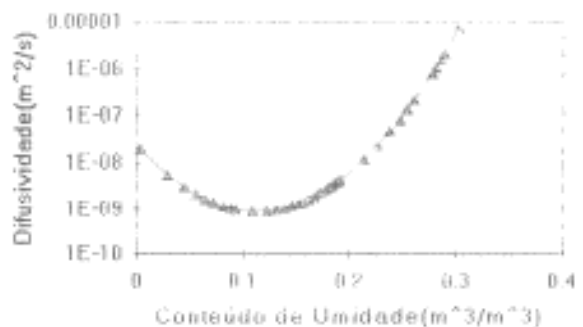


Figura 11 Difusividade de massa para a argamassa de cal e cimento

A condutividade hidráulica K é uma função monótona crescente do conteúdo de umidade e o resultado obtido mostra que os valores de K descrevem com θ_l entre 0 e 0.07 m³/m³. De fato, é muito difícil obter resultados precisos para os coeficientes de transporte em experimentos de embebição, quando o conteúdo de umidade é muito baixo. Uma nova série de experimentos está sendo realizada, mas usando uma concepção diferente para baixos conteúdos.

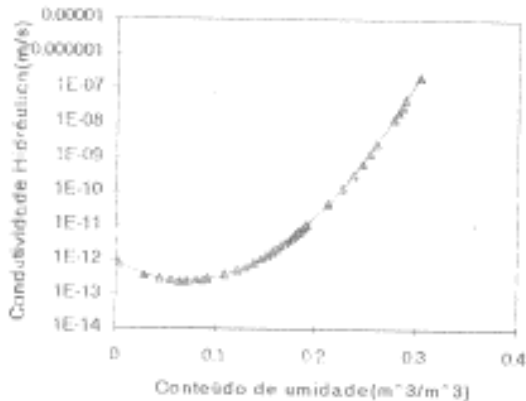


Figura 12 Condutividade Hidráulica K para a argamassa de cal e cimento.

Referências

- 1] Philip, J.R., *The theory infiltration: Sorptivity and algebraic infiltration equations*, Soil Sci., 84, 257-264 (1957);
- 2] Gummerson, R.J., Hall, C., Hoff, W.D., *Water movement in porous building materials-II. Hydraulic suction and sorptivity brick and other masonry materials*, **Building and Environment**, 15, 101-108 (1980);
- 3] Van Der Kooi, *Moisture transport in Cellular Concrete Roofs*, **Doctoral Thesis**, Eindhoven University, Eindhoven (1971).
- 4] Galbraith, G.H., Maclean, R.C., *Realistic vapour permeability values*, **CIB Journal**, 98-103 (1985),
- 5] Bomberg, M. *Testing water vapor transmission: Unresolved issues*, **ASIM, STP 1039: Water Vapor Transmission through Building Materials and Systems**, 157-167, (1989);
- [61] Fernandes, C. P., *Estudo dos processos de condensação e migração de umidade em meios porosos consolidados. Análise experimental de uma argamassa de cal e cimento*, **Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC**, Florianópolis (1990);
- [71] Yunes, P.R., *Estudo da microestrutura de uma argamassa de cal e cimento*, **Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC**, Florianópolis (1992),
- [81] Bueno, A.D., Philippi, P.C., Lamberts, R., *Influence of Water Vapour Sorption on the Thermal Behavior of Masonry Materials*, **Building Masonry Materials Symposium**, Londres, outubro/1992
- [91] Philippi, P.C; *Microestrutura dos materiais porosos usados em edificações e sua influência sobre os processos de fixação e transferência de, umidade*, Monografia, **Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC**, Florianópolis (1992);