

# AValiação DA CINÉTICA DE SECAGEM DO TIJOLO CERÂMICO

Eva Barreira<sup>1</sup>  
barreira@fe.up.pt

João M. P. Q. Delgado<sup>2</sup>  
jdelgado@fe.up.pt

Vasco P. Freitas<sup>3</sup>  
vpfreita@fe.up.pt

## Resumo

A humidade nos edifícios está normalmente associada à ocorrência de patologias, que podem resultar da presença de água no material ou elemento construtivo ou da sua evaporação. O processo de secagem desempenha, por isso, um papel fundamental na quantidade de água disponível, quer no interior do material, quer na sua superfície.

Este artigo apresenta os resultados de uma avaliação experimental da cinética de secagem do tijolo cerâmico. Para tal, foram realizados ensaios laboratoriais usando diferentes amostras, em que a cinética de secagem foi avaliada considerando condições ambientais diversas (temperatura e humidade relativa do ar). Foram ajustados vários modelos de cinética de secagem de primeira ordem para descrever o fenómeno e estimar o grau de saturação de equilíbrio das amostras e o tempo de secagem.

Os resultados experimentais mostraram que o fluxo de secagem ao longo da primeira fase do processo de secagem depende fortemente da temperatura e da humidade relativa da ambiência, variando de 0.025 kg/m<sup>2</sup>h (T=15°C e HR=80%) a 0.135 kg/m<sup>2</sup>h (T=30°C e HR=50%), nas condições mais e menos adversas. Verificou-se uma diminuição do tempo de secagem com o aumento da temperatura e a diminuição da humidade relativa, sendo maior o impacto da variação da humidade relativa.

Por fim, a análise aos resultados apontam para um melhor ajuste do modelo de Midilli, relativamente aos restantes modelos testados.

*Palavras-chave:* Secagem, Cinética de secagem, Tijolo cerâmico, Ensaios laboratoriais.

---

<sup>1</sup> Professor auxiliar, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

<sup>2</sup> Investigador Pós-Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

<sup>3</sup> Professor catedrático, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

# 1 Introdução

A presença de água tem grande influência na durabilidade dos materiais de construção. É através do processo de absorção e, sobretudo, durante a secagem, que podem ocorrer danos nos materiais. A secagem é um processo de transferência de massa complexo durante o qual acontecem mudanças estruturais e físico-químicas no interior dos materiais.

Os materiais mais correntes na construção civil são higroscópicos e de estrutura porosa. Segundo Krischer [1], podem distinguir-se três fases no processo de secagem, quando um material de construção saturado é colocado num ambiente com humidade relativa e temperatura constantes [2]. Na fase inicial, a água líquida no interior do material saturado é transportada para a superfície por capilaridade, sendo constante a quantidade de água evaporada e o fluxo de secagem. O fluxo de secagem depende apenas das condições exteriores e as características do material não têm influência no processo. A quantidade de água na forma de vapor libertada do material é inferior à quantidade de água líquida que se movimenta do interior para a superfície. Quando esta relação se inverte inicia-se a segunda fase.

A redução progressiva do transporte de água líquida do interior do material para a superfície diminui o fluxo de secagem, que passa a depender das propriedades capilares dos materiais. Nesta segunda fase, a evaporação da água deixa de ocorrer na superfície passando a ser realizada no interior do material. A água líquida transportada até então por capilaridade passa a ser transportada por difusão de vapor até à superfície do material, através de uma camada de material seco cada vez mais espessa. Durante esta fase do processo de secagem, uma parte do material encontra-se no domínio higroscópico, enquanto que outra parte se encontra no domínio capilar.

A terceira, e última fase, inicia-se quando todo o material se enquadra no domínio higroscópico, ou seja, quando o teor de humidade crítico é superior ao teor de humidade em todo o material. Esta fase é caracterizada por haver um equilíbrio higroscópico e o fluxo de secagem tender para zero.

Na maioria dos materiais, nomeadamente os materiais com uma estrutura porosa estável, o processo de secagem, isto é, a variação da massa em função do tempo, pode ser traduzido por equações de cinética de primeira ou segunda ordem [3-4].

Tabela 1: Exemplos de alguns modelos empíricos e semi-empíricos.

<b>Equação</b>	<b>Denominação</b>
$MR = e^{-t/t_c}$	Newton
$MR = e^{-t^n/t_c}$	Page
$MR = e^{-(t/t_c)^n}$	Page modificada

Equação	Denominação
$MR = a \times e^{-t/t_c}$	Henderson e Pabis
$MR = a \times e^{-t/t_{c1}} + b \times e^{-t/t_{c2}}$	Dois-Termos
$MR = a \times e^{-t/t_{c1}} + (1-a) \times e^{-t/t_{c2}}$	Aproximação difusiva
$MR = a \times e^{-t/t_{c1}} + b \times e^{-t/t_{c2}} + c \times e^{-t/t_{c3}}$	Henderson e Pabis modificado
$MR = a \times e^{-t/t_c} + c$	Logarítmico
$MR = a \times e^{-t^n/t_c} + b \times t$	Midilli <i>et al.</i>
$t = a \ln(MR) + b [\ln(MR)]^2$	Thompson
$MR = 1 + at + bt^2$	Wang e Singh
$MR = e^{-(t \cdot t_c)^n}$	Distribuição de Weibull
$MR = e^{-(t/t_{c1})/(1+t/t_{c2})}$	Aghbashlo <i>et al.</i>
$MR = (a + t/t_c)^2$	Vega e Lemus
$MR = a \cdot e^{-(t^n/t_{c1})} + b \cdot e^{-(t^n/t_{c2})}$	Hii <i>et al.</i>

Na literatura há vários parâmetros que podem ser utilizados na escolha do modelo de cinética de secagem que melhor se adapta aos resultados experimentais. No presente trabalho, o ajuste do modelo aos resultados experimentais foi avaliado através da menor soma das percentagens de desvio entre os dados experimentais ( $MR_{exp}$ ) e os teóricos ( $MR_{teo}$ ) ao longo do tempo.

## 2 Ensaios realizados

Os ensaios de secagem foram realizados em amostras de tijolo maciço de  $5.5 \times 5.5 \times 11 \text{ cm}^3$ , em condições constantes de temperatura e humidade relativa. Antes do início do ensaio, as amostras foram saturadas com água. O processo de secagem de cada amostra foi analisado para quatro gamas de temperatura ( $15^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$  e  $30^\circ\text{C}$ ) e 3 valores de humidade relativa (50%, 65% e 80%).

Foi utilizada uma câmara climática para garantir condições constantes de temperatura e humidade relativa, tendo sido cada um dos parâmetros fixado de forma independente. Uma balança de precisão foi colocada no interior da câmara climática e as variações de massa registadas automaticamente de 10 em 10 min.

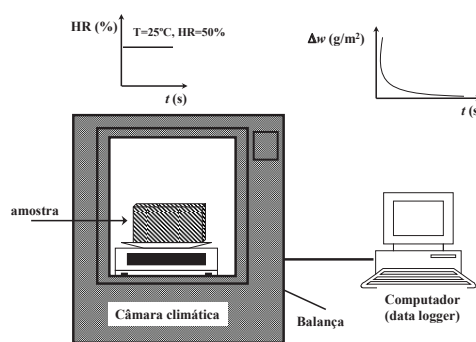


Figura 1: Montagem experimental.

### 3 Resultados e Discussão

A Figura 2 mostra um exemplo da variação no tempo do grau de saturação ( $MR$ ) e do fluxo de secagem das amostras de tijolo cerâmico testadas. As amostras saturadas sofreram processos de secagem a diferentes temperaturas e humidades relativas.

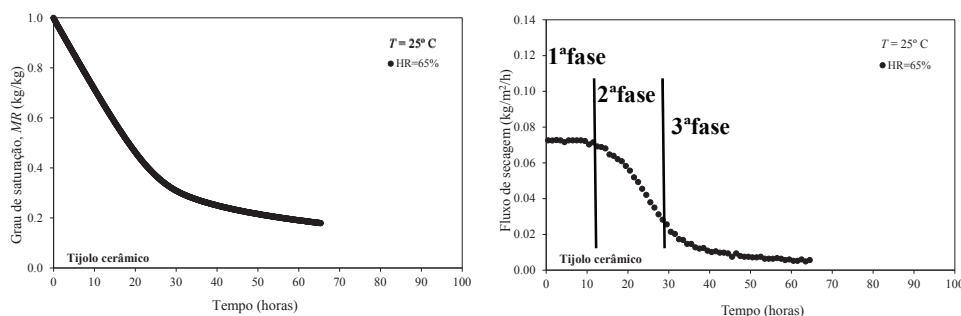


Figura 2: Resultados experimentais da variação do grau de saturação e do fluxo de secagem em função do tempo, para  $T=25^{\circ}\text{C}$  e  $HR=65\%$ .

Os resultados experimentais mostram que o grau de saturação diminuiu linearmente nas primeiras horas de secagem (1ª fase do processo de secagem), o que corresponde a um fluxo de secagem praticamente constante nesse período. Nesta fase inicial o teor de humidade é praticamente constante no interior da amostra e o fluxo de secagem depende fundamentalmente das condições exteriores de secagem. Quando a transferência de água líquida do interior para a superfície diminui, a frente húmida desloca-se para o interior, passando a secagem a efectuar-se por difusão a partir da frente húmida [4]. Nestas condições o fluxo de secagem deixa de ser constante passando a ter um comportamento linear, i.e., diminui linearmente com o tempo. A terceira fase do processo de secagem, no regime higroscópico, é bastante demorada, como se pode observar na Figura 2.

A Figura 3 e a Tabela 2 mostram os valores do fluxo de secagem obtidos para as duas primeiras fases do processo de secagem, para as diferentes condições de temperatura e humidade relativa analisadas. É possível verificar que estes valores são semelhantes aos obtidos por Freitas [4], para o mesmo tipo de material e condições ambiente semelhantes ( $T=20^{\circ}\text{C}$  e  $HR=70$ ).

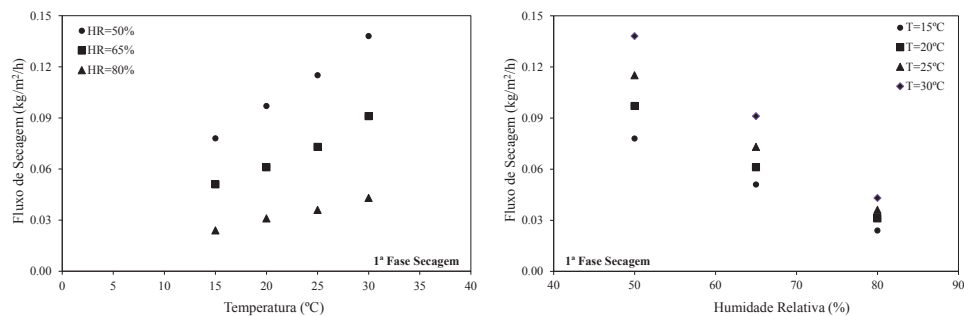


Figura 3: Variação do fluxo secagem em função da temperatura e da humidade relativa, para a 1ª fase do processo de secagem.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de secagem (fluxos de secagem) e constantes de secagem e do tempo de secagem ( $t_c$ ) obtidas através do modelo de Midilli *et al.*

T (°C)	HR (%)	Secagem 1ª fase	Secagem 2ª fase	K (h <sup>-1</sup> )	t <sub>c</sub> (h)
		Fluxo (kg/m <sup>2</sup> h)	Fluxo (kg/m <sup>2</sup> h)		
15	50	0.075	0.075 – 0.025	0.024	41.4
20	50	0.095	0.095 – 0.025	0.030	33.3
25	50	0.115	0.115 – 0.030	0.044	22.9
30	50	0.135	0.135 – 0.030	0.060	16.7
15	65	0.050	0.050 – 0.015	0.012	87.0
20	65	0.060	0.060 – 0.015	0.017	57.4
25	65	0.075	0.075 – 0.020	0.024	41.2
30	65	0.090	0.090 – 0.020	0.032	31.3
15	80	0.025	0.025 – 0.006	0.004	245.5
20	80	0.030	0.030 – 0.006	0.004	245.1
25	80	0.035	0.035 – 0.007	0.006	168.0
30	80	0.045	0.045 – 0.010	0.011	91.2
20 <sup>[*]</sup>	70 <sup>[*]</sup>	0.060 <sup>[*]</sup>	0.060 – <0.025 <sup>[*]</sup>	---	---

[\*] Valores retirados de Freitas [4]

Os modelos matemáticos apresentados na Tabela 1 foram testados para descrever o processo de secagem, tendo sido considerado mais adequado o modelo de Midilli (Figura 4). As constantes de secagem ( $K$ ) e do tempo de secagem ( $t_c$ ) obtidas através do modelo de Midilli para cada ensaio são apresentadas na Tabela 2. Verifica-se que o modelo aponta no mesmo sentido das medições, isto é, uma diminuição do tempo de secagem ocorre sempre que a temperatura aumenta e que a humidade relativa diminui, sendo maior o impacto da variação da humidade relativa.

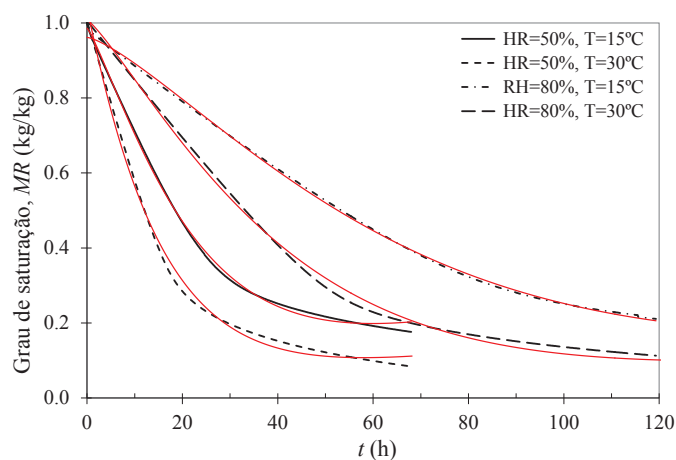


Figura 4: Resultados experimentais e preditivos de MR vs. tempo de secagem.

## 4 Conclusões

O principal objectivo deste trabalho foi avaliar a secagem de materiais de construção porosos, nomeadamente, do tijolo maciço. Verificou-se um aumento da taxa de secagem e, conseqüentemente, uma diminuição do tempo de secagem, com o aumento da temperatura e a diminuição da humidade relativa. Verificou-se também que o maior impacto no tempo de secagem resultou da variação da humidade relativa. Através de modelos da cinética de secagem, descreveu-se a secagem do tijolo com o auxílio de diversos modelos empíricos e semi-empíricos. O modelo semi-empírico que melhor descreveu o processo de secagem do tijolo cerâmico foi o de Midilli *et al.*

## 5 Bibliografia

- [1] Krischer, O, and K Kroell. "Technique Du Séchage." (1978).
- [2] Karoglou, M. "Water Sorption Isotherms of Some Building Materials." *Drying technology* 23, 1-2 (2005): 289-303.
- [3] Barreira, E, Delgado, JMPQ and VP de Freitas, "Wetting and Drying of Building Materials", *Drying and Wetting of Building Materials and Components*, Chap. 3, 51–69, edited by J.M.P.Q. Delgado, Book Series: Building Pathology and Rehabilitation - Vol. 4, Springer, ISBN: 978-3-319-04531-3 (2014).
- [4] Freitas, VP, "Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios", Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1992.