

Influência da temperatura de secagem na avaliação do desempenho do betão



Aires Camões¹

RESUMO

Em determinados ensaios, nomeadamente para aferição de alguns indicadores de durabilidade do betão, o condicionamento de provetes exige a sua secagem em estufa a uma temperatura predeterminada, por um período de tempo suficiente para os provetes atingirem uma condição de massa constante. A temperatura de secagem, apesar de ser um dos parâmetros prescritos e a satisfazer na norma ou especificação de ensaio, difere de ensaio para ensaio. Mais ainda, por vezes, na execução dos ensaios é frequente o recurso a temperaturas de secagem elevadas de forma a atingir mais rapidamente a condição de massa constante. Neste contexto, pretende-se, com este trabalho, avaliar a influência do procedimento de condicionamento nos resultados dos ensaios, devido, essencialmente, à variação da temperatura de secagem dos provetes. Para tal, utilizaram-se as seguintes temperaturas de secagem: $40 \pm 5^\circ\text{C}$; $75 \pm 5^\circ\text{C}$; e $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Estas temperaturas foram adoptadas para a secagem de diferentes provetes de betão que foram posteriormente submetidos aos seguintes ensaios: absorção de água por imersão (ensaio à pressão atmosférica e no vácuo); absorção de água por capilaridade; permeabilidade ao oxigénio e à água; e profundidade de penetração de água sob pressão. Com base nos resultados obtidos é possível concluir que um aumento da temperatura de secagem altera significativamente os resultados dos indicadores de durabilidade determinados.

PALAVRAS-CHAVE

Condicionamento; temperatura; secagem; porosidade; indicadores de durabilidade.

¹ Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. aires@civil.uminho.pt

1. INTRODUÇÃO

A quantidade de água contida nos poros do betão e a sua distribuição espacial podem influenciar significativamente o desempenho em obra e, também, afectar os resultados laboratoriais resultantes do ensaio de provetes [1-4]. A permeabilidade aos gases e a cinética de absorção de água por imersão são particularmente sensíveis ao teor de humidade dos provetes na altura dos ensaios [1] devido ao efeito de bloqueio dos poros associado ao grau de saturação do betão [2]. Este bloqueio é resultado da presença de água nos poros, quer sob a forma líquida, quer sob a forma de vapor [2,3].

Esta dependência do teor em água pode facilmente ser minimizada. Assim, para obviar este aspecto, em geral, procede-se à secagem dos provetes antes de os submeter a ensaio. À medida que o betão seca, a água presente nos poros transforma-se em vapor de água e evapora devido ao gradiente de pressão associado ao vapor de água. A humidade relativa interna é superior à externa (meio envolvente) e o vapor de água move-se e atravessa a superfície de forma a originar um estado de humidade em equilíbrio com o meio ambiente exterior.

Como a secagem em condições próximas das ambientais é praticamente inviável (são precisos vários meses para secar um provete de betão com apenas alguns centímetros de espessura num ambiente com 55 a 60% de humidade relativa e uma temperatura de 20°C e obter um estado de humidade de equilíbrio [1]; e vários anos se a espessura do elemento de betão for de 20 cm [5]) é prática corrente recorrer-se à secagem dos provetes em estufa. As normas e especificações de ensaio preconizam o condicionamento dos provetes e exigem a sua secagem em estufa a uma temperatura predeterminada.

Contudo, apesar da secagem em estufa reduzir significativamente o tempo necessário ao condicionamento, as temperaturas elevadas a que os provetes são submetidos podem originar uma secagem severa do gel de cimento, afectando irremediavelmente a microestrutura do material cimentício e aumentando a sua porosidade e permeabilidade [1].

Bahador e Jong [2] avaliaram o efeito da temperatura de pré-condicionamento dos provetes de betão em ensaios acelerados e concluíram que submeter os provetes a uma temperatura de secagem de 40°C danifica a estrutura porosa do betão, principalmente à superfície. Segundo os mesmos autores, a secagem dos provetes a uma temperatura de 105°C provoca um aumento do diâmetro médio dos poros para cerca do triplo e também aumenta a conectividade entre poros.

A temperatura de secagem, apesar de ser um dos parâmetros prescritos nas normas ou especificações de determinados ensaios, difere de ensaio para ensaio. Mais ainda, por vezes, na execução dos ensaios é prática laboratorial corrente o recurso a temperaturas de secagem mais elevadas de forma a atingir mais rapidamente a condição de massa constante.

Neste contexto, pretendeu-se, com este trabalho, avaliar a influência do procedimento de condicionamento nos resultados dos ensaios, designadamente a variação da temperatura de secagem dos provetes. Para tal, procedeu-se ao ensaio de diferentes provetes de betão sujeitos a temperaturas de secagem distintas: $40 \pm 5^\circ\text{C}$; $75 \pm 5^\circ\text{C}$; e $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Os provetes foram submetidos aos seguintes ensaios: determinação da variação do teor de humidade ao longo do processo de secagem; absorção de água por imersão (ensaio à pressão atmosférica e no vácuo); absorção de água por capilaridade; permeabilidade ao oxigénio e à água; e penetração de água sob pressão.

2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Recorrendo a um cimento CEM I 42.5R, a uma areia de rio e a uma brita granítica, foi fabricado um betão com cerca de 50 mm de abaixamento no cone de Abrams e com a composição expressa no Quadro 1.

Quadro 1. Composição do betão.

<i>Material</i>	<i>Dosagem</i> [kg/m ³]
Cimento	350
Areia	729
Brita	1123
Água	192.5

Deste betão foram extraídas amostras de modo a permitir determinar em provetes secos à temperatura de 40°C, 75°C e 105°C: i) a evolução do teor de humidade com o tempo ao longo do processo de secagem; ii) a absorção de água por imersão à pressão atmosférica; iii) a absorção de água por imersão sob vácuo; iv) a absorção de água por capilaridade; v) a permeabilidade ao oxigénio; vi) a permeabilidade à água; e vii) a penetração de água sob pressão.

Após a desmoldagem, efectuada no dia seguinte ao da betonagem, todos os provetes foram conservados imersos em água a uma temperatura de cerca de 20°C durante 7 dias. Seguidamente, procedeu-se à operação de secagem dos provetes, que foi efectuada em estufa ventilada. Após o período de secagem os provetes foram mantidos durante um dia a cerca de 20°C num exsiccador de modo a serem ensaiados à temperatura ambiente.

Para todos os ensaios realizados, cada resultado apresentado corresponde ao valor médio respeitante ao ensaio de três provetes distintos.

Foram, também, realizados ensaios de resistência à compressão do betão produzido com base no disposto na NP EN 12390-3 [6]. Os ensaios foram realizados em provetes cúbicos de 100 mm de aresta (conservados imersos em água a 20°C) aos 7 e aos 28 dias de idade (3 por idade) obtendo-se os resultados constantes do Quadro 2.

Quadro 2. Resistência média à compressão (f_{cm}) do betão e respectivo coeficiente de variação (δ).

<i>Idade</i> [dias]	<i>f_{cm}</i> [MPa]	<i>δ</i> [%]
7	29.1	5.8
28	34.5	8.5

2.1 Teor em água

A determinação da variação do teor em água do betão ao longo do período de secagem foi efectuada com recurso a provetes cúbicos com 150 mm de aresta. A variação da humidade foi aferida recorrendo a duas metodologias distintas: i) por intermédio de sucessivas pesagens dos provetes, ao longo do processo de secagem; e ii) por utilização de um higrómetro baseado na medição da resistividade eléctrica, com o qual se registou o teor de humidade em três profundidades diferentes e, também, em instantes distintos do processo de secagem (Figura 1). Para tal, foi necessário preparar os provetes, fazendo 4 furos com cerca de 8 mm de diâmetro numa mesma face do cubo de 150 mm de aresta. A profundidade desses 4 furos foi mantida constante por provete, tendo sido utilizados 3 provetes, cada qual com furos de 17 mm, 34 mm e 54 mm de profundidade, em consonância com os eléctrodos utilizados, cuja conexão foi efectuada por intermédio do enchimento dos furos com pasta de contacto antes da realização das medições.



Figura 1. Medição do teor de humidade de um provete de betão recorrendo a um higrómetro.

2.2 Absorção de água por imersão à pressão atmosférica

A porosidade aberta, medida por intermédio da quantidade de água absorvida por imersão à pressão atmosférica, foi determinada com base na especificação LNEC E 394 [7] em provetes cúbicos de 100 mm de aresta. De acordo com a especificação, os provetes deverão ser secos a uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ numa estufa ventilada até atingir a condição de massa constante. Considerou-se atingida esta condição quando a diferença entre as massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas de pelo menos 24 horas, foi inferior a 0.1% da média das duas leituras.

Para além dos ensaios em provetes secos até atingirem a condição de massa constante referida, foram também submetidos a ensaio provetes secos durante um período de tempo superior, perfazendo 32 dias em estufa.

2.3 Absorção de água por imersão sob vácuo

A absorção de água por imersão sob vácuo foi determinada com base no descrito na especificação LNEC E 395 [8] em provetes com 50 mm de diâmetro e 40 mm de espessura, sujeitos às mesmas temperaturas de secagem. A especificação LNEC E 395 [8], à semelhança da E 394 [7] obriga à secagem em estufa ventilada à temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante um período de tempo suficiente para adquirirem massa constante.

2.4 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi determinada com base na especificação LNEC E 393 [9] em provetes cúbicos com 100 mm de aresta. Foram submetidos a ensaio provetes previamente sujeitos às diferentes temperaturas referidas anteriormente até atingirem massa constante. De acordo com a especificação LNEC os provetes deverão ser secos à temperatura de 40°C numa estufa ventilada durante um período de 14 dias. Os ensaios decorreram ao longo de 3 dias.

2.5 Permeabilidade ao oxigénio

O ensaio de permeabilidade ao oxigénio foi feito com base no disposto na especificação LNEC E 392 [10]. Esta especificação prevê a possibilidade de secar os provetes numa estufa ventilada a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ durante 7 dias, seguido de conservação durante 3 dias num exsiccador a uma temperatura de 20°C . A permeabilidade ao oxigénio foi avaliada por intermédio de ensaios, nos provetes com 50 mm de diâmetro e 40 mm de altura previamente testados à absorção de água por imersão no vácuo, utilizando um permeâmetro desenvolvido na Universidade de Leeds [11]. Este equipamento permite que os

provetes sejam submetidos a um fluxo em estado estacionário que os atravessa a uma dada pressão e durante um determinado período de tempo.

2.6 Permeabilidade à água

Os mesmos provetes utilizados no ensaio de absorção de água por imersão por vácuo foram, posteriormente, sujeitos ao ensaio de permeabilidade ao oxigénio e, seguidamente, ao ensaio de permeabilidade à água. Este foi feito com base na especificação LNEC E 413 [12], que indica ser necessário garantir como condição de referência de humidade dos provetes a sua conservação durante 2 dias a uma temperatura de $50 \pm 5^\circ\text{C}$ e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa, seguida de permanência durante 1 dia num exsiccador a $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

2.7 Profundidade de penetração de água sob pressão

A profundidade de penetração de água foi, também, aferida com base no ensaio preconizado pela NP EN 12390-8 [13], mas submetendo a ensaio provetes secos com $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$. A pressão da água foi aumentada para 950 kPa e o tempo de ensaio foi reduzido para 20 horas devido, também, à maior permeabilidade dos provetes secos em comparação com os saturados, previstos na norma.

À semelhança do ensaio de absorção de água por imersão à pressão atmosférica, foram ensaiados provetes secos até atingirem a condição de massa constante e provetes secos durante um período de tempo mais alargado, correspondente a uma permanência em estufa de 32 dias.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Teor de humidade

A Figura 2 representa a perda de peso das amostras durante a secagem, sujeitas a diferentes temperaturas (40, 75 e 105°C).

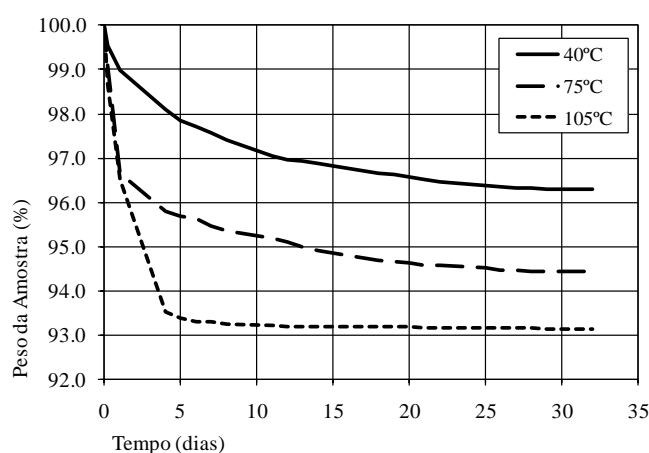


Figura 2. Perda de peso durante a secagem (em % do peso saturado dos provetes).

Conforme se pode constatar por observação da Figura 2, a temperatura de secagem influencia fortemente a perda de massa dos provetes: quanto maior a temperatura de secagem maior a perda de massa verificada nos provetes. É, também, de salientar que o peso da amostra tende a estabilizar mais rapidamente quanto maior for a temperatura de secagem e, o peso dos provetes no final do tempo do ensaio (32 dias) é tanto menor quanto maior a temperatura de secagem.

Influência da temperatura de secagem na avaliação do desempenho do betão

Para atingir a condição de massa constante, foram precisos 19 dias para a temperatura de secagem de 40°C, 14 dias para 75°C e 11 dias para 105°C.

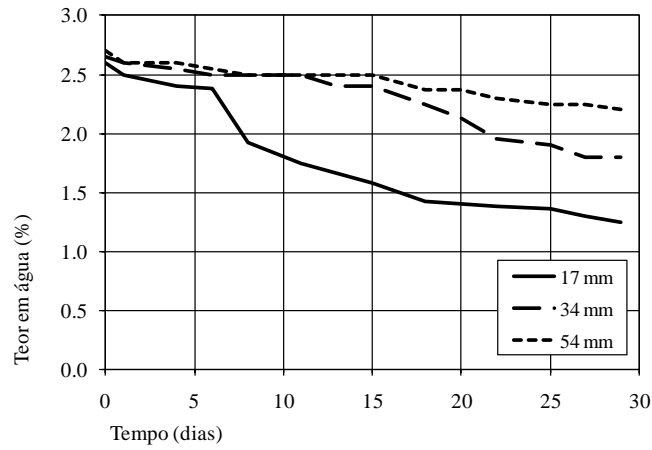


Figura 3. Variação do teor em água medido pelo higrómetro durante a secagem a 40°C em função da profundidade dos electrodos.

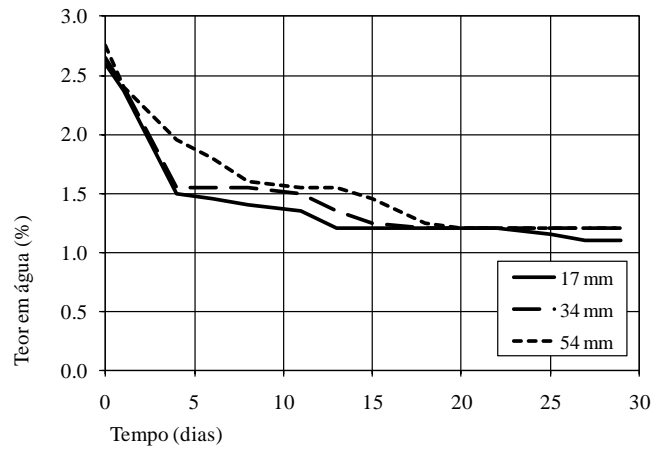


Figura 4. Variação do teor em água medido pelo higrómetro durante a secagem a 75°C em função da profundidade dos electrodos.

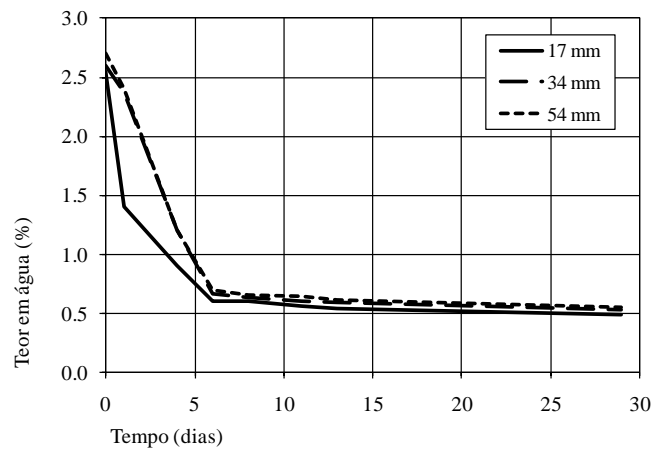


Figura 5. Variação do teor em água medido pelo higrómetro durante a secagem a 105°C em função da profundidade dos electrodos.

Os resultados obtidos com o higrómetro, expressos em teor de água, apresentam-se nas Figuras 3 a 5, correspondendo às três diferentes profundidades testadas.

Por observação das Figuras 3, 4 e 5 é possível verificar que a configuração das curvas é semelhante à das apresentadas na Figura 2 e que o equipamento usado é sensível à profundidade de penetração dos eléctrodos: o teor em água aumenta com a profundidade. Este facto é evidente nos provetes secos a 40°C e atenua-se com o aumento da temperatura de secagem.

Os teores em água, em percentagem do peso dos provetes secos, fornecidos pelo higrómetro e apresentados nas Figuras 3 a 5 foram obtidos recorrendo à tabela de calibração do equipamento. No entanto, de forma a verificar se existe alguma correlação entre os valores medidos no higrómetro e o teor em água registado nos ensaios de perda de massa, compararam-se os respectivos valores. Considerou-se para valor medido no higrómetro o correspondente à média dos três registos efectuados em diferentes profundidades dos provetes. O resultado apresenta-se na Figura 6.

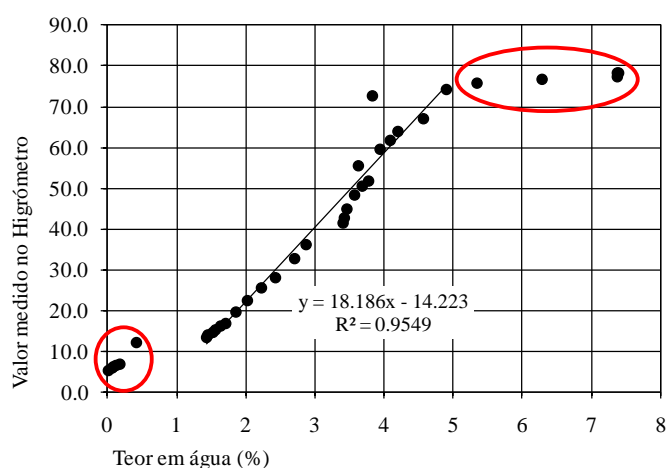


Figura 6. Comparação entre os valores medidos com o higrómetro e os registados nos ensaios de perda de massa.

Analisando a Figura 6, é possível verificar que o higrómetro consegue prever adequadamente o teor em água dos provetes, excepto nas condições extremas. Ou seja, quando os provetes estão saturados ou secos ou muito próximo dessas condições. O valor medido no higrómetro relaciona-se linearmente com o teor em água, obtendo-se uma correlação forte desde que não se considerem os pares de valores assinalados na Figura 6.

3.2 Porosidade aberta

Conforme descrito anteriormente, a porosidade aberta foi aferida por intermédio do ensaio de absorção de água por imersão à pressão atmosférica (p.a.) e sob vácuo. Os resultados obtidos nos provetes secos até atingir a condição de massa constante apresentam-se na Figura 7. A porosidade aberta (ensaio à pressão atmosférica) foi, também, avaliada após um período de secagem superior ao necessário a atingir a condição de massa constante (MC), correspondente a 32 dias de exposição às diferentes temperaturas. A comparação dos resultados apresenta-se na Figura 8.

Conforme se pode constatar por observação das Figuras 7 e 8, a temperatura de secagem dos provetes influencia significativamente o resultado dos ensaios de porosidade aberta por imersão em água. O aumento da temperatura de secagem danifica a estrutura porosa do betão, levando a acréscimos substanciais da porosidade: comparativamente com os provetes secos a 40°C, a porosidade dos secos a 75°C aumentou 44% e dos secos a 105°C 57%. Os resultados mostraram que o resultado é, também, afectado pelo tempo de secagem. Se bem que a diferença registada em provetes secos a 75°C ou

105°C não foi significativa, o mesmo não se pode afirmar relativamente à secagem a 40°C. Efectuar o ensaio após 32 dias em estufa ventilada conduziu a resultados 17% superiores aos verificados quando atingida a condição de massa constante (ao fim de 19 dias).

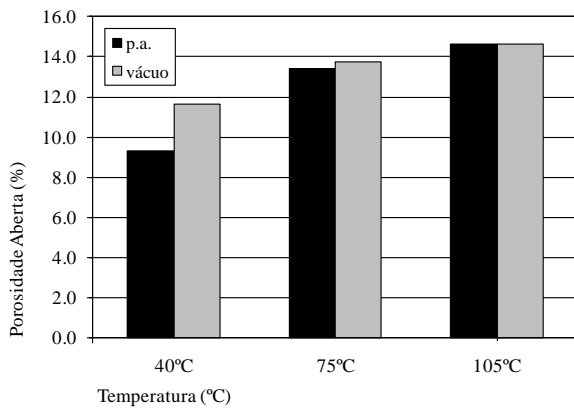


Figura 7. Porosidade aberta.

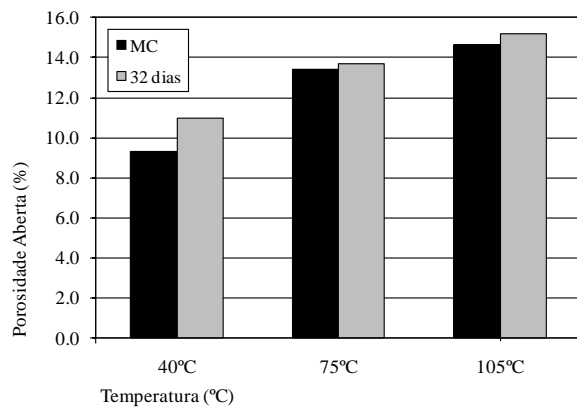


Figura 8. Influência do tempo de secagem na porosidade aberta.

3.3 Absorção de água por capilaridade

A Figura 9 representa a cinética de absorção capilar, registada no decorrer dos 3 dias de ensaio, e os resultados do coeficiente de absorção capilar (S), determinados considerando as primeiras 8 horas do ensaio, apresentam-se na Figura 10.

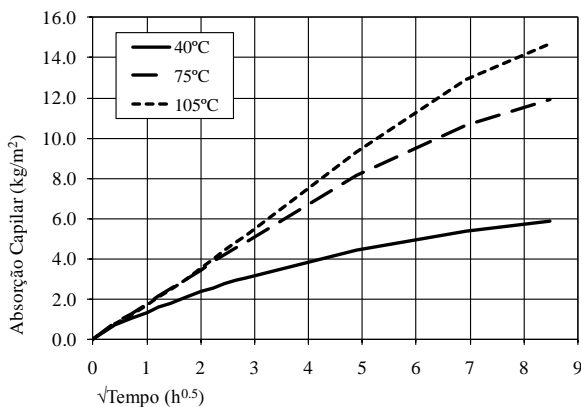


Figura 9. Cinética de absorção capilar.

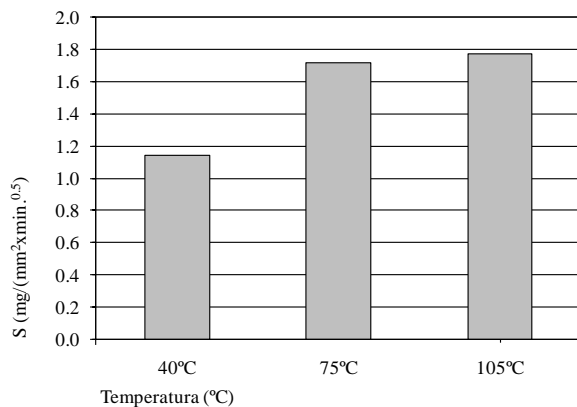


Figura 10. Coeficiente de absorção capilar (S).

O aumento da temperatura de secagem influencia esta propriedade de forma semelhante à porosidade aberta.

3.4 Permeabilidade ao oxigénio e à água

Na Figura 11 é possível observar os resultados da permeabilidade intrínseca ao oxigénio (K_0) e na Figura 12 os resultados da permeabilidade à água (K_w) e constatar que a temperatura altera a estrutura porosa do betão.

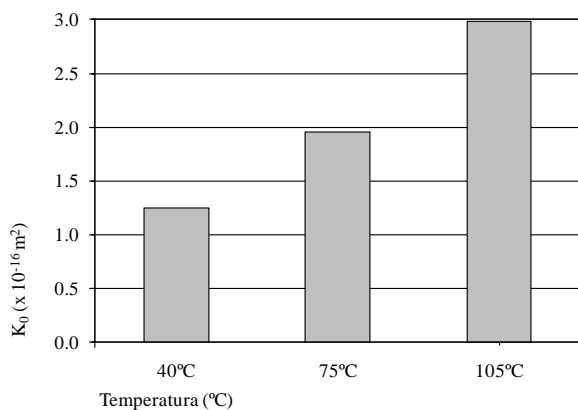


Figura 11. Permeabilidade intrínseca ao oxigénio.

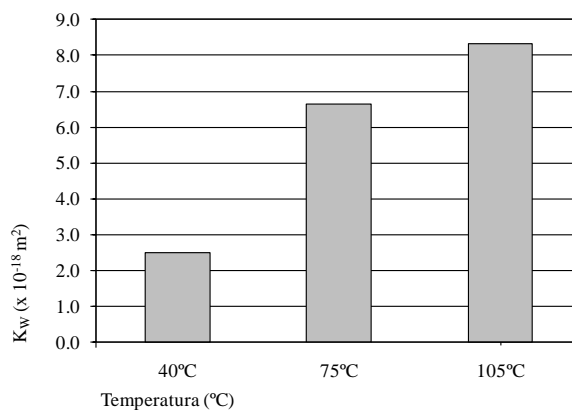


Figura 12. Permeabilidade à água.

3.5 Profundidade de penetração de água sob pressão

A Figura 13 mostra a variação da profundidade de penetração da água com a temperatura e com o tempo de secagem.

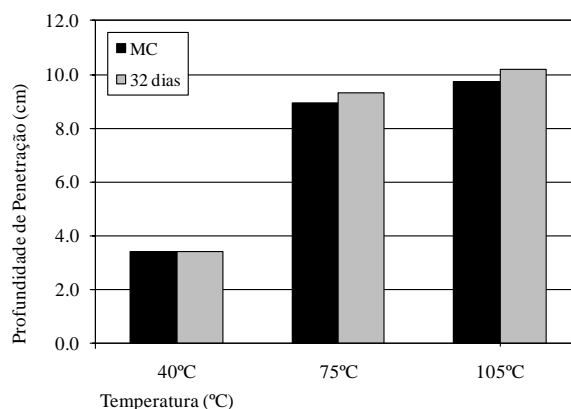


Figura 13. Variação da profundidade de penetração da água com a temperatura e com o tempo de secagem.

A profundidade de penetração da água foi claramente influenciada pela temperatura de secagem dos provetes mas o tempo de secagem (até atingir a massa constante (MC) ou 32 dias) não afectou substancialmente os resultados do ensaio.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que a temperatura de secagem utilizada para condicionar os provetes a submeter a ensaio influencia significativamente os resultados. O aumento da temperatura de secagem danifica a estrutura porosa do betão e é responsável por acréscimos consideráveis dos indicadores de durabilidade determinados, que correspondem a perdas de desempenho. Por exemplo, preparar os provetes de um mesmo betão para o ensaio de absorção de água por imersão, secando-os a 40°C ou 105°C, originou um acréscimo de porosidade aberta de 57% e uma profundidade de penetração de água sob pressão de quase o triplo (aumento de 186%). As diferenças obtidas nos resultados são muito mais ténues quando comparados os resultados correspondentes a temperaturas de secagem de 75°C e 105°C.

O teor em água dos provetes pode ser estimado recorrendo a um higrómetro baseado na medição da resistividade eléctrica. Apenas nas condições extremas, quando o provete se encontra saturado ou seco, a utilização do higrómetro conduz a resultados não comparáveis com os teores em água determinados por intermédio das perdas de massa verificadas ao longo do período de secagem dos provetes.

Quanto maior a temperatura de secagem mais rápida esta se processa. Secar os provetes durante mais tempo que o necessário à obtenção de massa constante aumenta a absorção de água por imersão e a profundidade de penetração de água. Porém, nos ensaios efectuados, essa diferença só foi significativa (17%) nos provetes sujeitos ao ensaio de absorção de água e secos à temperatura de 40°C.

REFERÊNCIAS

- [1] PARROTT, L.J. – Moisture conditioning and transport properties of concrete test specimens. *Materials and Structures: RILEM*, Vol. 27, 1994. 460-468 p.
- [2] BAHADOR, S.; JONG, H.C. – Effect of preconditioning of concrete under accelerated test. *Proceedings of World in Concrete and Structure*, Singapore, 2006. 127-134p.
- [3] KANARE, H.M. – Moisture in concrete and moisture-sensitive finishes and coatings. *Cement Concrete & Aggregates*, Australia, April 2007. 1-12 p.
- [4] BHARGAVA, J.; LUNDBERG, K. – Determination of moisture content of concrete by microwave-resonance method. *Materials and Structures: RILEM*, Vol. 5, 1972. 165-168 p.
- [5] PARROT, L.J. – Factors influencing relative humidity in concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 43, 1991. 45-52 p.
- [6] NP EN 12390-3 – Ensaio do betão endurecido. Parte 3: resistência à compressão dos provetes de ensaio. Instituto Português da Qualidade, 2003.
- [7] LNEC E 394 – Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio à pressão atmosférica. LNEC, 1993.
- [8] LNEC E 395 – Betões. Determinação da absorção de água por imersão. Ensaio no vácuo. LNEC, 1993.
- [9] LNEC E 393 – Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade. LNEC, 1993.
- [10] LNEC E 392 – Betões. Determinação permeabilidade ao oxigénio. LNEC, 1993.
- [11] CABRERA, J.G. – Design and production of high performance concrete. *Proceedings of International Conference, Infrastructure Regeneration and Rehabilitation Improving the Quality of Life Through Better Construction*, Sheffield, U.K., 1999. 1-14 p.
- [12] LNEC E 413 – Betões. Determinação permeabilidade ao ar e à água. Método de Figg. LNEC, 1993.
- [13] NP EN 12390-8 – Ensaio do betão endurecido. Parte 8: profundidade de penetração da água sob pressão. Instituto Português da Qualidade, 2009.