

Abordagem multi-física ao comportamento em serviço das estruturas de betão: Monitorização dos campos internos de humidade

**Miguel
Azenha¹**

**José
Granja¹**

**Christoph
Sousa¹**

**Margarida
Vieira¹**

**Joaquim
Barros¹**

**Rui
Faria²**

RESUMO

No âmbito do projeto de investigação denominado SeLCo – “Comportamento em serviço de estruturas de betão: uma abordagem multi-física das tensões autoinduzidas” – está a ser realizado um conjunto de trabalhos conducentes ao estabelecimento de abordagens de simulação higo-mecânica para estudo do carácter não uniforme das tensões associadas à retração de secagem em estruturas de betão armado. De facto, a secagem do betão ocorre de forma progressiva da superfície para o interior, originando deformações impostas. Para que possam ser simuladas as tensões decorrentes destes processos é primeiramente necessário dispor de modelos capazes de simular os campos de humidade, devidamente fundamentados em resultados obtidos através de medições experimentais. O presente artigo dedica atenção ao último aspeto, apresentando um conjunto de trabalhos realizados com o intuito de melhor compreender os desafios envolvidos na monitorização da humidade interna no betão. Apesar de haver vários trabalhos na bibliografia relativamente a este assunto, são escassos os que comparam o desempenho de metodologias e sensores para medição da humidade interna no betão. Neste trabalho são apresentados vários conjuntos de experiências que comparam o desempenho de sensores e de procedimentos de monitorização, explanando-se as principais ilações e estratégias a adotar no contexto do programa experimental a conduzir no âmbito da investigação sobre tensões autoinduzidas no betão.

Palavras-chave: Secagem; Humidade interna; Monitorização; Retração de secagem

1. INTRODUÇÃO

A retração de secagem do betão é um fenómeno bem conhecido no domínio da Engenharia Civil, estando essencialmente relacionada com a perda de água da rede porosa por evaporação para o ambiente circundante, criando subpressões ao nível da matriz cimentícia, que por sua vez justificam a contração do material ao nível macroscópico. O impedimento total ou parcial dessa contração nas estruturas de betão conduz ao aparecimento de tensões de tração, que por sua vez são frequentemente causadoras de fissuração.

O cálculo de esforços associados ao impedimento da retração de secagem é usualmente feito no pressuposto de que as extensões de retração são uniformes ao longo das secções transversais dos elementos estruturais, o que não corresponde à verdade, na medida em que a secagem se processa do exterior para o interior das peças. Assim, no início do processo de secagem apenas a camada superficial do betão tende a retrair, sendo que a zona interior (ainda saturada) não tem ainda tendência

¹ Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal. miguel.azenha@civil.uminho.pt; granja@civil.uminho.pt; christoph@civil.uminho.pt; a54011@alunos.uminho.pt; barros@civil.uminho.pt

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal. rfaria@fe.up.pt

de retração de secagem. É portanto criado um estado de tensão não uniforme que evolui ao longo do processo de secagem.

O presente trabalho insere-se numa investigação de âmbito alargado conducente ao desenvolvimento de capacidades de simulação multi-física do comportamento em serviço de estruturas de betão, tendo em conta a distribuição não uniforme da humidade no betão, e as correspondentes tensões autoequilibradas. Tal conhecimento poderá contribuir para previsões mais sustentadas e realistas da fissuração em serviço nas estruturas de betão. No artigo será apresentado um estudo relativo à monitorização dos campos de humidade que se desenvolvem no interior do betão durante a secagem. Dada a intenção de monitorizar de forma prolongada os perfis de humidade em peças de betão, e tendo em conta a reconhecida dificuldade na utilização de sensores de humidade, foi realizado um conjunto de ensaios comparativos do desempenho de sensores, e da influência nas medições de diferentes formas de colocar os sensores de humidade no betão.

Relativamente à organização do artigo, para além da presente introdução é apresentado na Secção 2 um conjunto de observações sobre o conceito de humidade relativa (HR) interna do betão, acompanhado de uma discussão crítica da sua utilidade no contexto da simulação multi-física da retração de secagem. Na Secção 3 são discutidas as principais metodologias utilizadas para monitorização de perfis de HR em betão, com especial ênfase sobre as metodologias que foram utilizadas no contexto deste trabalho. O trabalho experimental realizado é apresentado na Secção 4, que descreve e discute um conjunto de vários testes laboratoriais conducentes à definição de estratégias robustas para monitorização de perfis de humidade, contemplando vários ensaios comparativos e a discussão dos correspondentes resultados. O artigo termina com a apresentação das principais conclusões e recomendações relativas à monitorização da HR interna do betão.

2. CONCEITO DE HUMIDADE RELATIVA INTERNA NO BETÃO

A água contida no betão é normalmente classificada em duas principais categorias: a evaporável e a não evaporável [1]. A água não evaporável compreende todas as moléculas de água que se encontram quimicamente ligadas aos compostos hidratados do cimento, ou com ligações físicas de forte intensidade, tornando inviável a evaporação desta água para a rede porosa e para o ambiente circundante do betão [2]. A definição de água evaporável é complementar à definição que acaba de ser apresentada para a água não evaporável, na medida em que corresponde a toda a água existente no betão que não se enquadra na classificação de “não evaporável”. A simulação da distribuição interna de água no betão desde as primeiras idades levaria à necessidade da consideração explícita da existência de água evaporável e não evaporável, avaliando as transições da água do estado evaporável para o não evaporável durante a hidratação do cimento. No entanto, caso o âmbito da simulação seja restringido ao betão endurecido, i.e., após a ocorrência da maior parte das reações de hidratação (e portanto da auto-dessecação), pode-se considerar apenas a água evaporável (também designada de água livre), relevante portanto para a retração de secagem.

A água evaporável existe na rede porosa do betão em várias formas, podendo estar no estado líquido, adsorvida nas paredes dos poros, ou no estado gasoso, em equilíbrio com a fase líquida. Existem vários modelos de simulação numérica do estado da água no betão que consideram explicitamente a existência de dois campos físicos de água (líquida e gasosa), avaliados separadamente, mas com acoplamento entre si, relacionado com as transições líquido-gás e gás-líquido [2]. Nestes modelos, a água líquida e gasosa é genericamente expressa em função do peso de água por unidade de volume de betão. Apesar do rigor científico associado à separação da água nas suas fases, este tipo de modelos revela-se complexo e de difícil validação, uma vez que não é possível dispor de metodologias experimentais que permitam medir a água interna nos seus vários estados e elaborar perfis de forma quantitativa [3]. Assim sendo, no presente trabalho optou-se pela simulação da distribuição interna da água evaporável através da HR da matriz porosa, que é uma grandeza que pode ser monitorizada, e que adicionalmente pode ser relacionada de forma relativamente direta com o mecanismo da retração através da relação entre a pressão capilar nos poros e a sua humidade [4]. No entanto, é de ressaltar

que o conceito de HR interna é uma abstração, na medida em que a humidade em cada poro está intrinsecamente ligada ao seu diâmetro, coexistindo numa mesma matriz cimentícia poros de menor diâmetro em estado de completa saturação e poros de maior diâmetro com baixa HR. A humidade interna do betão pode então definir-se como a HR da fase gasosa da rede porosa que está em equilíbrio com o líquido intersticial da mesma rede [5] para uma dada temperatura. É esta grandeza de humidade interna que se considera no presente estudo, focando-se a seguinte secção nas modalidades para a correspondente monitorização.

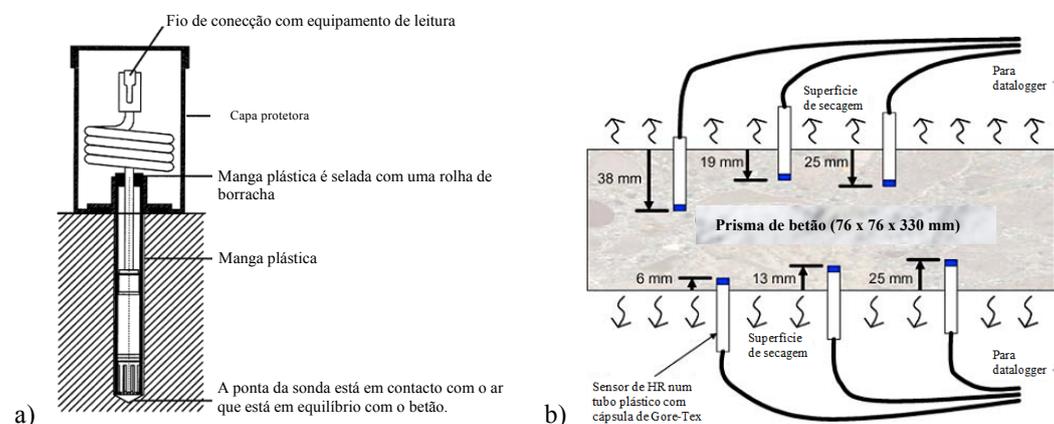
3. METODOLOGIAS DE MEDIÇÃO DA HUMIDADE INTERNA DO BETÃO

3.1 Considerações gerais

Todos os trabalhos encontrados na bibliografia relativos a medição interna da HR do betão recorrem à medição da humidade relativa do ar existente num macro-poro no interior do material, com recurso a sensores de humidade relativa [4, 6-15]. Nas secções que se seguem será feita uma breve descrição dos sistemas disponíveis e dos utilizados no âmbito deste trabalho, divididos em duas categorias principais: os sistemas integrados disponíveis no mercado (secção 3.2) e os baseados na utilização de sensores de humidade introduzidos em macro-poros (secção 3.3).

3.2 Sistemas comerciais integrados: Vaisala e Proceq

Dada a utilidade do conhecimento da HR interna na indústria da construção de pavimentos, o qual é utilizado para apoio a decisões de aplicação de camadas de impermeabilização, existem vários sistemas no mercado para efetuar medição de humidade interna [16, 17]. No contexto do presente trabalho foram utilizados os sistemas Vaisala HM44 e Proceq Hygropin. Ambos os sistemas se baseiam na furação do betão endurecido com uma broca, introduzindo-se no seu interior uma manga plástica oca que cria um macro-poro com o comprimento da manga – ver Fig. 1a –, e que numa das extremidades contacta a zona do betão a monitorizar, estando selado com tampa estanque na extremidade oposta. Sempre que se pretende efetuar uma medição da humidade, abre-se pelo menor período de tempo possível a tampa de selagem e introduz-se o sensor de humidade que ocupa a maior parte do espaço da manga plástica, selando-se novamente a parte posterior desta. O sensor é deixado em repouso até estabilização da humidade que é registada. Seguidamente retira-se o sensor e volta-se a selar a tampa até nova medição. Ambos os sistemas integrados utilizados recorrem a sensores de humidade capacitivos com precisão anunciada de $\pm 2.0\%$ (Vaisala) e $\pm 1.5\%$ (Proceq). Os sistemas diferem também ao nível do diâmetro das mangas plásticas, que é de 15mm para o Vaisala e de 6mm para o Proceq. Refere-se também que ambos os sistemas permitem o pré-embecimento da manga plástica aquando da betonagem, o que possibilita a medição da humidade logo após a presa do betão. A utilização dos sistemas integrados em contexto científico, com o objetivo de monitorizar perfis de humidade relativa em peças de betão tem sido reportada já por vários autores [9].



3.3 Sistemas baseados em sensores de humidade: Sensirion e Honeywell

No âmbito de trabalhos de investigação relacionados com a monitorização da humidade interna do betão, têm sido sugeridos vários sistemas experimentais muito semelhantes aos integrados, na medida em que são também usados sensores de humidade para medição da HR num macro-poro criado para o efeito [4, 11, 14, 15]. A diferença principal reside no facto dos sensores de humidade permanecerem no interior do macro-poro durante todo o período de medição, evitando-se a necessidade de acesso recorrente ao macro-poro. Assim a metodologia torna-se potencialmente mais fiável do que os sistemas integrados, na medida em que não há necessidade sistemática de acesso ao macro-poro (com potencial perturbação dos campos de humidade), e mais confortável dado que os sensores podem ficar ligados a um sistema de aquisição automática, registando de forma contínua os valores da humidade.

Os sistemas encontrados na bibliografia para este tipo de ensaio são relativamente semelhantes entre si [4, 11, 14, 15], com pré-embecimento de elemento impermeável oco no betão, e posterior preenchimento com material que impede a entrada do betão. Após a presa, o material de preenchimento é retirado, colocando-se o sensor de humidade (normalmente capacitivo) e selando-se a extremidade oposta. Nos trabalhos de Grasley *et al.* [4] é utilizada uma abordagem mais abrangente, dado que o sensor é pré-colocado e selado dentro do macro-poro, estando este protegido na extremidade de medição com tecido Gore-Tex (a cor azul na Fig. 1b), que é impermeável à água líquida, mas permeável ao vapor de água. Assim, Grasley *et al.* [4] indicam ser possível a medição da humidade de forma contínua desde o instante da betonagem, conseguindo inclusive captar as reduções de humidade interna associadas aos fenómenos de auto-dessecação do betão. Mais recentemente foi também proposto um sistema por Chang e Hung [15] que consiste no encapsulamento do sensor de humidade num cubo composto por paredes permeáveis ao vapor (propriedades semelhantes ao Gore-Tex), que permite o embecimento completo do sensor, sem que haja prolongamento do respetivo encamisamento até à superfície. O sensor utilizado suporta-se em tecnologia sem fios, facilitando a sua aplicação *in-situ*.

No âmbito deste trabalho foram utilizadas várias configurações experimentais de colocação de sensores, conforme descrições detalhadas da Secção 4, versando por exemplo a avaliação da influência da utilização de Gore-Tex sobre as medições de humidade. No que diz respeito aos sensores de humidade utilizados, optou-se por recorrer apenas a sensores capacitivos por serem relativamente económicos, precisos e de fácil utilização. Os sensores utilizados foram então o Sensirion SHT75 e o Honeywell HIH4000, que são de dimensões bastante reduzidas: $3.7 \times 13.5 \times 3.1 \text{ mm}^3$ e $4.17 \times 21.29 \times 2.03 \text{ mm}^3$, respetivamente. A diferença essencial entre eles reside na forma de interrogação do sensor. O sensor SHT75, que anuncia uma precisão da ordem dos $\pm 2\%$, incorpora um conversor do sinal analógico para digital, pelo que a sua interrogação exige sistemas especificamente dotados para o efeito através de programação dos protocolos de comunicação digital do sensor. O sensor HIH4010, com uma precisão de $\pm 3.5\%$, permite a leitura direta do sinal analógico, podendo ser interrogado por qualquer sistema com capacidade de medição de diferença de potencial (p. ex., um multímetro). Indique-se que ambos os sensores integram folha de calibração por parte do fabricante.

4. EXPERIÊNCIAS RELATIVAS À MONITORIZAÇÃO DA HR INTERNA NO BETÃO

4.1 Considerações gerais

Dada a ausência na bibliografia de estudos comparativos de métodos higrométricos para monitorização de humidade no betão, e tendo em conta várias dificuldades identificadas pelos autores em programas experimentais anteriores, foi realizado um conjunto de ensaios laboratoriais para melhor conhecer as limitações e possibilidades dos métodos de monitorização. Os ensaios foram elaborados com base nas metodologias genericamente descritas na Secção 3, e dividem-se em cinco categorias principais, conforme as subsecções 4.2 a 4.6.

4.2 Calibração e desempenho relativo dos sistemas de medição

Antes da comparação do desempenho dos sensores utilizados no contexto da medição de humidade interna no betão, foi efetuada uma comparação do desempenho relativo na medição da humidade ambiente. Para esta experiência inicial foram utilizados os seguintes sensores: 1 Vaisala (V), 1 Hygropin (Hy), 3 Honeywell (H1, H2 e H3) e 3 Sensirion (S1, S2 e S3). Refira-se que o ensaio em questão decorreu sem qualquer tipo de calibração prévia, tendo sido usados os dados de calibração do fabricante. Indica-se também que, praticamente, todos os sensores se encontravam em uso laboratorial há alguns meses. O ensaio inicial de calibração decorreu numa câmara climática a 20°C, recorrendo-se a soluções salinas de humidade conhecida [18] em pequenas caixas com dimensões $10.7 \times 22.8 \times 13.2 \text{ cm}^3$, seladas para sujeitar os sensores nelas introduzidos ao seguinte historial de HR (assinalado na Fig. 2a como “HR imp.”): das 0h às 4.4h foi imposta uma HR=75% com uma solução salina de NaCl (fase 1); das 4.4h às 21.5h foi imposta uma HR=33.1% com uma solução salina de MgCl_2 (fase 2a); às 21.5h foi trocada a solução salina de MgCl_2 por outra idêntica para aferição de continuidade do comportamento dos sensores (fase 2b), tendo permanecido até às 45.5h; entre as 45.5h e as 51h foi utilizada uma solução salina de K_2SO_4 para obter uma HR=97%; entre as 51h e as 75h a HR foi alterada para 11.3% com uma solução de LiCl. A comparação do desempenho relativo dos vários sensores está representada na Fig. 2a, verificando-se dispersões bastante elevadas que atingiram cerca de $\pm 10\%$ de HR pelas 10h de ensaio. No entanto, após a realização deste ensaio todos os sensores foram sujeitos a procedimentos de calibração com um equipamento específico para o efeito (também baseado em sais) – Vaisala HMK15 [18] –, o que permitiu o estabelecimento de novas constantes de calibração para os vários sensores, com diferenças relevantes em comparação com os valores fornecidos pelo fabricante. Da aplicação das novas constantes de calibração aos dados colhidos pelos sensores no contexto da Fig. 2a, obtiveram-se os resultados indicados na Fig. 2b. Constata-se agora uma coerência muito boa entre os vários tipos de sensores, com diferenças entre si que sempre ficaram abaixo dos 2% de HR. Verificou-se também que o tempo de resposta dos vários sensores se revelou bastante semelhante, sendo apenas um pouco mais lento quando as transições de humidade são mais abruptas (por exemplo: fase 2–fase 3 e fase 3–fase 4). Constatou-se assim a grande importância de executar calibrações regulares dos sensores de humidade, assegurando o seu bom desempenho em ambientes padrão de HR conhecida.

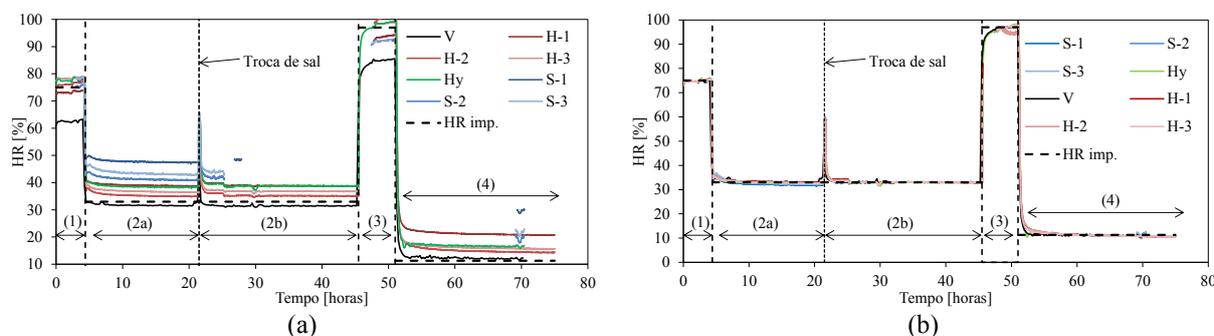


Figura 2. Exposição dos sensores a ambientes de humidade controlada: a) valores medidos antes da calibração individual dos sensores; b) Valores retificados após calibração dos sensores

Para que se pudessem tirar ilações relativas ao desempenho relativo dos vários tipos de sensor nas condições a que são sujeitos no contexto de medição de HR em betão, i.e., dentro de um macro-poro embebido, foi efetuado um conjunto de experiências adicionais. Estas consistiram na colocação de cada sensor de humidade a testar dentro de um tubo em PVC com 15mm de diâmetro interior e 70mm de comprimento, conforme indicado na Fig. 3a. Uma das extremidades do tubo foi selada com recurso a fita adesiva plástica, técnica com desempenho comprovado em experiências anteriores. Na extremidade oposta do tubo foi colocado um disco de pasta de cimento fresca (com CEM I 42.5R e $a/c=0.5$) de 3mm de espessura e diâmetro igual ao do interior do tubo de PVC (ver Fig. 3a). Durante as primeiras 68h de ensaio a pasta foi mantida em condições de selagem com a fita adesiva. Após as 68h de idade foi removida a fita adesiva, permitindo-se a secagem da pasta de cimento para o ambiente circundante com $T=20^\circ\text{C}$ e $\text{HR}=75\%$ (garantido com solução salina de NaCl). Para este

ensaio foram utilizados os 4 tipos de sensores em análise, com designação V7 (Vaisala), Hy7 (Hygropin), S7 (Sensirion) e H7 (Honeywell). O decorrer do ensaio com colocação dos sensores dentro de contentor com humidade controlada está ilustrado na Fig. 3b (na foto há mais sensores do que os que acabam de ser descritos, devido à simultaneidade de ocorrência de outros ensaios).

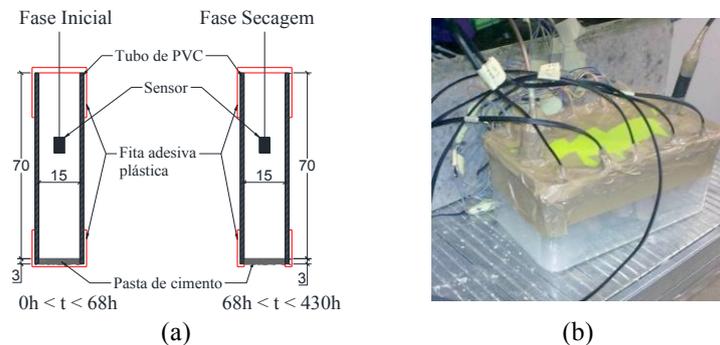


Figura 3. a) Esquema de ensaio (dimensões em mm); b) Ensaio em curso para a fase de secagem com HR=75%

Os resultados obtidos neste ensaio estão representados na Fig. 4, onde se pode confirmar a coerência dos sensores com o comportamento expectável durante as primeiras 68h, com HR próximas dos 100%, associadas à selagem eficaz e à reduzida auto-dessecação da pasta de cimento (a/c elevada). Observa-se também uma coerência bastante boa entre os vários sensores para o instante final do ensaio (18 dias), com desvios de HR menores do que $\pm 2.5\%$. A tendência monotónica de descida da humidade entre os 3 e os 18 dias é também bastante similar nos vários sensores, mas com diferenças mais relevantes entre os 4 e os 6 dias. Presume-se que uma parte significativa destas diferenças possa estar relacionada com ligeiras diferenças na espessura dos discos de pasta de cimento utilizados. De notar ainda que quando os sensores de humidade são expostos por longos períodos a HR muito elevadas (acima de 95%) podem sofrer descalibração e/ou um atraso nas medições quando a humidade no ar voltar a diminuir. Esta característica foi observada no decorrer deste ensaio, ainda que de forma muito diminuta, por meio da análise dos resultados do sensor Hygropin. Este sensor apresenta um atraso na resposta de $\sim 1.6h$.

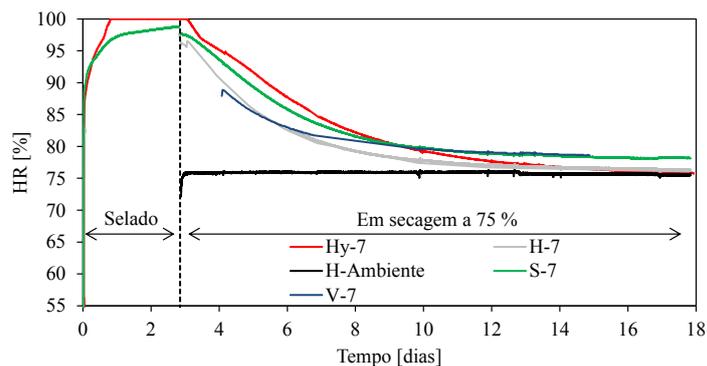


Figura 4. Resultados do ensaio relativo ao comportamento relativo dos sensores em macro-poro

4.3 Influência da utilização de tecidos Gore-Tex para proteção do sensor

Nos vários trabalhos de Grasley *et al.* [4, 10, 19] é utilizada uma membrana de Gore-Tex para proteção do sensor durante a betonagem, permitindo que aquele permaneça instalado de forma contínua desde as primeiras idades. No entanto, dada a ausência de estudos sobre o efeito desta estratégia na qualidade das medições, foi efetuado um programa experimental dedicado ao estudo deste aspeto. Se for tido em conta que a permeabilidade do Gore-Tex é cerca de 1×10^6 maior do que a permeabilidade típica de uma pasta de cimento, será de esperar que não haja qualquer efeito adverso.

No entanto, há que ter em conta a possibilidade de colmatação parcial do Gore-Tex pelos produtos de hidratação do cimento, justificando a relevância deste ensaio. Foram estudados dois tipos de tecido Gore-Tex com características de respirabilidade distintas, aqui designados por Gore-Tex normal (respirabilidade $9\text{m}^2\text{Pa/W}$) e Gore-Tex militar (respirabilidade $13\text{m}^2\text{Pa/W}$). O princípio do ensaio é muito semelhante ao explanado na subsecção anterior, diferindo apenas nas dimensões do tubo de PVC (agora com 40mm de comprimento) e na inclusão de uma membrana de Gore-Tex entre a pasta de cimento e o tubo conforme indicado na Fig. 5a. Neste ensaio foram apenas utilizados sensores Sensirion (denotados pela letra S) e Honeywell (assinalados pela letra H). Em todos os restantes aspetos, nomeadamente no que diz respeito ao procedimento experimental e condições ambientais, este ensaio é idêntico ao descrito na secção 4.3. Foram testados 6 provetes: dois sem Gore-Tex (H4 e S4), dois com Gore-Tex normal (H4N e S4N) e dois com Gore-Tex militar (H4M e S4M). Devido a uma falha do sensor S4N, a informação correspondente não é mostrada no gráfico de resultados da Fig. 5b. Por observação dos resultados é possível constatar que a inclusão do Gore-Tex na interface entre o macro-poro e a pasta de cimento não teve efeito relevante. De facto, o nível de dispersão de resultados é em tudo semelhante ao já reportado na secção anterior.

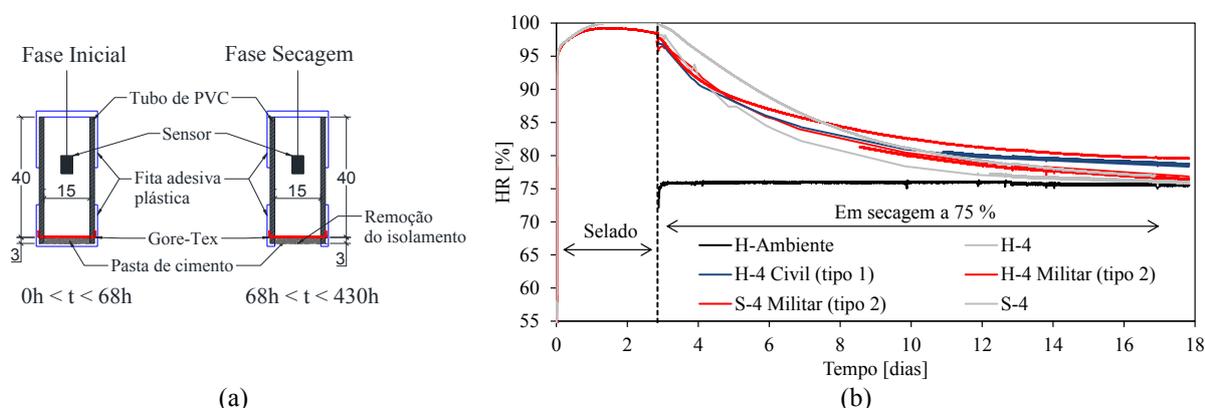


Figura 5. a) Esquema de ensaio com Gore-Tex (dimensões em mm); b) Resultados do ensaio com Gore-Tex

4.4 Relevância do tamanho do macro-poro utilizado para medição

Nos estudos reportados na bibliografia [4, 6-17] há discrepâncias no que diz respeito ao volume do macro-poro utilizado para medição da humidade interna do betão. Para avaliar a potencial relevância do tamanho do macro-poro nas medições foi executado um procedimento experimental semelhante ao descrito em 4.2, variando apenas o comprimento do macro-poro. Estudou-se o efeito com os sensores Sensirion e Honeywell, com comprimentos de macro-poro de 25mm, 40mm e 70mm (referências S2.5, S4, S7 e H2.5, H4 e H7, respetivamente). Para referência, os resultados são comparados com os já explanados para Hy7 e V7 no contexto da secção 4.2. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 6, onde se pode constatar que o comprimento do macro-poro foi aparentemente irrelevante, dada a semelhança da dispersão com a já mostrada em 4.2. Este tipo de comportamento seria algo expectável por aplicação da equação universal dos gases perfeitos. De facto, e a título exemplificativo, num estudo paramétrico elaborado pelos autores deste trabalho [20], ficou demonstrado que a quantidade de água que é necessária remover ao macro-poro para reduzir a sua humidade de 100% para 70% é de $54\mu\text{g}$, $86\mu\text{g}$ e $150\mu\text{g}$ para os poros de comprimento de 25mm, 40mm e 75mm, respetivamente. Esses valores são manifestamente pequenos perante as quantidades de água libertadas pelo disco de pasta, pelo que a maior necessidade de água para equilíbrio da humidade não teve influência visível nos resultados.

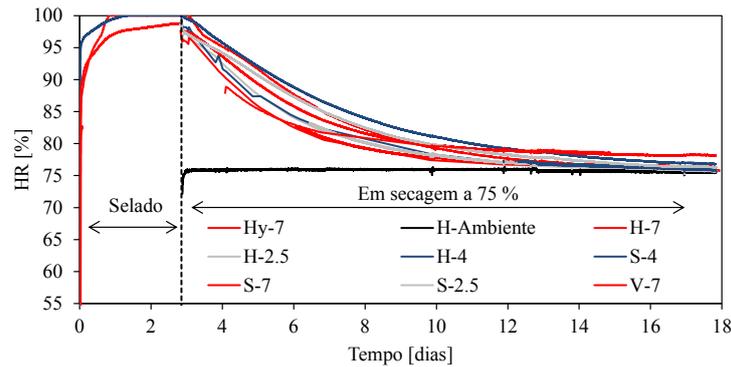


Figura 6. Resultados correspondentes ao estudo do efeito da dimensão do macro-poro

4.5 Uso de sensores permanentemente instalados vs monitorização discreta

Um dos aspetos mais criticáveis dos sistemas integrados de medição de humidade comerciais analisados no contexto deste trabalho é a potencial alteração do estado de HR interna do betão associada aos processos de abertura e fecho do macro-poro para colocação dos sensores. Tendo em conta os resultados reportados na secção 4.4, e presumindo que há uma selagem adequada da extremidade do macro-poro entre instantes de medição, não será de esperar a existência de problemas. No entanto, para avaliar diretamente esta questão foi efetuada uma experiência com recurso a 2 sistemas Vaisala, em 2 provetes de pasta de cimento de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ com $a/c=0.5$. Ambos os sistemas foram utilizados com a manga plástica fornecida pelo fabricante, com 3cm de diâmetro e 6cm de comprimento, colocando-se a extremidade de leitura da manga a 1cm de profundidade relativamente à extremidade na qual ocorre a secagem. Os provetes foram mantidos em condições seladas durante os primeiros 7 dias de idade, tendo as superfícies perpendiculares ao eixo da manga plástica sido expostas à secagem. Todas as restantes superfícies foram seladas com parafina, garantindo fluxos de humidade unidireccionais. Na fase de secagem os provetes foram mantidos em condições de temperatura e HR controladas ($T=20^\circ\text{C}$ e $\text{HR}=60\%$). Um dos sensores Vaisala foi utilizado de acordo com as indicações do fabricante, sendo retirado e recolocado nos instantes em que se pretendeu fazer a medição (VN), e o outro sensor foi colocado em permanência no interior do macro-poro, estando sempre selado (VF). Os resultados das medições desde o instante de exposição à secagem estão representados na Fig. 7, onde se pode confirmar que as medições registadas pelas duas metodologias foram idênticas em todos os instantes analisados. Trata-se, no entanto, de um ensaio que durou cerca de 2 meses (sensor muito superficial), pelo que poderá ser necessário efetuar testes de validação adicionais em que a profundidade de monitorização seja superior, motivando maiores tempos de secagem, e portanto maior suscetibilidade a perturbações associadas à remoção e recolocação do sensor.

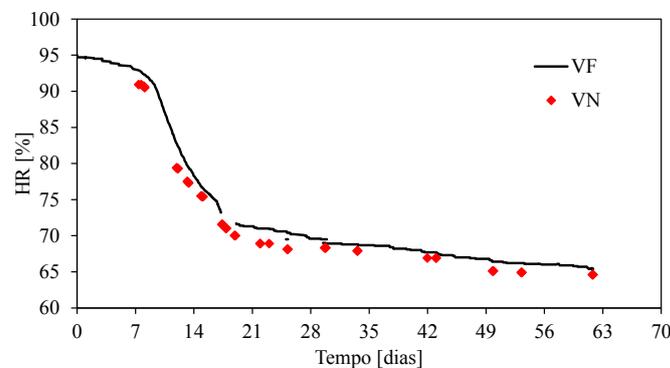


Figura 7. Resultados do ensaio para avaliação do efeito de acesso ao macro-poro em instantes discretos

CONCLUSÕES

O presente trabalho, enquadrado no âmbito de um projeto de investigação relativo à simulação multi-física do comportamento de estruturas de betão em serviço, focou-se sobre a capacidade de monitorização de perfis de humidade no betão. Foi efetuado um programa experimental dedicado à compreensão das diferenças de desempenho de vários tipos de sensores de HR, bem como aos procedimentos experimentais para medição da humidade interna no betão. Dos vários conjuntos de experiências realizados resultaram as seguintes conclusões e recomendações principais:

- A calibração dos sensores de humidade desempenha um papel fundamental na obtenção de resultados de monitorização adequados, sendo recomendável que a recalibração seja tão mais frequente quanto mais intensiva for a utilização dos sensores.
- Após adequada calibração, todos os tipos de sensor de humidade utilizados revelaram comportamento coerente, quer na medição da humidade ambiente, quer na medição da HR de material cimentício, quando encapsulados num macro-poro.
- A inclusão de tecido Gore-Tex na interface entre o macro-poro que contém o sensor e o material cimentício em estudo não conduziu a desvios nos resultados medidos, apontando para a viabilidade de utilização deste material para permitir medições de humidade interna no betão ainda no estado fresco (o Gore-Tex protege o sensor da entrada de betão no macro-poro, permitindo no entanto as trocas de humidade). Contudo é necessário ter cuidados especiais devido à possibilidade de saturação dos sensores quando estes estão sujeitos a $HR > 95\%$, que provoca a descalibração do sensor.
- Nos estudos realizados com variação do volume do macro-poro que aloja o sensor, compreendendo volumes entre $\sim 4.4\text{cm}^3$ e $\sim 12.4\text{cm}^3$, não se observou qualquer efeito relevante sobre a HR monitorizada no material cimentício. Este tipo de comportamento seria expectável em face da diminuta quantidade de água necessária para alterar a humidade do macro-poro, mas não foi encontrado nenhum estudo na bibliografia relativamente a este assunto.
- A comparação dos resultados obtidos com estratégias de medição baseadas na introdução discreta de sensores de humidade no macro-poro de monitorização, ou na instalação permanente de sensores no macro-poro (sem abertura deste para efetuar medições), permitiu constatar a inexistência de efeitos prejudiciais à acuidade da medição quando se utiliza a primeira estratégia num horizonte de monitorização de cerca de 2 meses. A plausibilidade de utilização de sistemas integrados baseados em estratégias de medição discreta no tempo, de menor custo final (uma vez que pode bastar um sensor para medir vários pontos), ficou confirmada com esta experiência.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio financeiro da FCT materializado na bolsa de doutoramento concedida ao segundo autor (PTDC/ECM/099250/2008), no financiamento do projeto de investigação PTDC/ECM/099250/2008 e no apoio às Unidades de Investigação ISISE e LABEST. Agradece-se também à ADI o apoio através do financiamento do projeto LEGOUSE - “Pré-fabricação Modular de Edifícios de Custos Controlados”. O amável fornecimento de amostras de tecido por parte da empresa 4N Comércio Internacional de Têxteis, Lda. é também reconhecido.

REFERÊNCIAS

- [1] Neville, A. (1995). *Properties of Concrete* vol. Third edition. London: Longman Singapore Publishers Pte Ltd.
- [2] Azenha, M. (2009). *Numerical Simulation of The Structural Behaviour of Concrete Since its Early Ages*. PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Porto, Porto.
- [3] Parrott, L. J. (1990). *A review os methods to determine the moisture conditions in concrete*, British Cement Association Publication C/7, 0-7210-1396-1.
- [4] Grasley, Z. C. [et al.] (2006). *Internal relative humidity and drying stress gradients in concrete*. *Materials and Structures*, vol. 39, pp. 901-909.

- [5] Baroghel-Bouny, V. [et al.] (1999). Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1225-1238.
- [6] Andrade, C. [et al.] (1999). Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1249-1259.
- [7] El-Dieb, A. S. (2007). Self-curing concrete: Water retention, hydration and moisture transport. *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 1282-1287.
- [8] Jiang, Z. [et al.] (2006). Internal relative humidity distribution in high-performance cement paste due to moisture diffusion and self-desiccation. *Cement and Concrete Research*, vol. 36, pp. 320-325.
- [9] Kim, J.-K.; Lee, C.-S. (1999). Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages. *Cement and Concrete Research*, vol. 29, pp. 1921-1927.
- [10] Grasley, Z. C. (2002). Measuring and Modeling the Time-dependent Response of Cementitious Materials to Internal Stresses. PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- [11] Lee, C. J. [et al.] (2011). Prediction of Moisture Curling of Concrete Slabs for Airfield Applications. *Materials and Structures*, vol. 44, pp. 787-803
- [12] Ryu, D.-W. [et al.] (2011). Effects of simulated environmental conditions on the internal relative humidity and relative moisture content distribution of exposed concrete. *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, pp. 142-153.
- [13] Ekaputri, J. J. [et al.] (2010), Internal relative humidity measurement on moisture distribution of mortar considering self-desiccation at early ages. presented at the JCI Annual Conference, Saitama, Japan.
- [14] Zhang, J. [et al.] (2009). Calculation of Moisture Distribution in Early-Age Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 135, pp. 871-881.
- [15] Chang, C.-Y.; Hung, S.-S. (2012). Implementing RFIC and sensor technology to measure temperature and humidity inside concrete structures. *Construction and Building Materials*, vol. 26, pp. 628-637.
- [16] Vaisala (1999). Humidity, dewpoint and temperature instruments. in *User's Guide*. ed. Helsinki, Finland: Vaisala Oyj., ed.
- [17] Proceq (2012). Hygropin - Operating Instructions - Moisture Meter. in *Proceq SA*, ed. Switzerland.
- [18] Vaisala (2006). Vaisala Humidity Calibrator - HMK15 - User's Guide. ed. Helsinki, Finland: Vaisala Oyj.
- [19] Grasley, Z. C. [et al.] (2006). Relative Humidity in Concrete - What does it mean? *Concrete international*, vol. 28, pp. 51-57.
- [20] Granja, J. L. [et al.] (2011). Medição de humidade no betão: Relatório final da tarefa 1. Relatório do Projeto PTDC/ECM/099250/2008 "SeLCo - Comportamento em serviço de estruturas de betão: uma abordagem multi-física das tensões autoinduzidas". unpublished.