



## **Estudo do efeito combinado da deformação impedida e do carregamento externo em lajes de betão armado: Resultados de um programa experimental**

**José Gomes**

ISISE, Dep. De Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Guimarães, Portugal, [jose89gomes@gmail.com](mailto:jose89gomes@gmail.com)

**José Granja**

ISISE, Dep. De Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Guimarães, Portugal, [granja@civil.uminho.pt](mailto:granja@civil.uminho.pt)

**Carlos Sousa**

CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, [cfsousa@fe.up.pt](mailto:cfsousa@fe.up.pt)

**Cláudio Ferreira**

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, [cfberreira@fe.up.pt](mailto:cfberreira@fe.up.pt)

**Rui Faria**

CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, [rfaria@fe.up.pt](mailto:rfaria@fe.up.pt)

**Dirk Schlicke**

Graz University of Technology, Institute of Structural Concrete, Graz, Austria, [dirk.schlicke@tugraz.at](mailto:dirk.schlicke@tugraz.at)

**Miguel Azenha**

ISISE, Dep. De Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Guimarães, Portugal, [miguel.azenha@civil.uminho.pt](mailto:miguel.azenha@civil.uminho.pt)

### **Resumo**

O controlo da fendilhação em estruturas de betão armado (BA) é fundamental para garantir o correto funcionamento ao longo do respetivo período de vida útil. No entanto, para estruturas sujeitas ao efeito combinado de retração restringida e carregamento externo (situação corrente em obras de engenharia civil), os atuais códigos de dimensionamento não fornecem regras claras e inequívocas para o controlo da abertura de fendas.

Neste trabalho pretende-se contribuir para o conhecimento, ainda limitado, das interações que ocorrem entre retração de secagem, viscoelasticidade e carregamentos externos, no processo de fissuração em lajes de BA axialmente restringidas. Para tal foi realizada uma campanha experimental onde se simulou a referida combinação de efeitos.

O método experimental proposto consiste na restrição (total ou parcial) da deformação axial de provetes de betão armado sujeitos, simultaneamente, a esforços de corte e de flexão. O sistema de restrição desenvolvido para este efeito permite que a força axial instalada no provete seja progressivamente ajustada através de dois atuadores hidráulicos ligados a um dos apoios, possibilitando o controlo da deformação axial num troço pré-definido do provete, onde é medida a extensão longitudinal média (restrição ativa).

O programa experimental incluiu a realização de ensaios simultâneos em provetes que representam um troço de uma laje maciça, sendo simuladas quatro situações distintas, por combinação do nível de restrição axial da retração e do nível de carga vertical. A conceção do sistema experimental foi

abordada por esta equipa de investigação no Encontro Nacional de Betão Estrutural - BE2018 [1], configurando um contributo importante para a implementação de futuras campanhas desta natureza noutros laboratórios. Os resultados obtidos ao longo de um período de 18 meses são apresentados no presente artigo, e constituem uma base de dados fundamental para a validação experimental no contexto de análises numéricas e analíticas em estruturas desta natureza.

**Palavras-chave:** Retração restringida; comportamento em serviço; betão armado; lajes maciças; análise experimental

## 1 INTRODUÇÃO

Em edifícios correntes de BA as deformações provocadas por diferenciais de temperatura e/ou secagem são comumente restringidas (parcial ou totalmente) por elementos de elevada rigidez (núcleos rígidos, paredes, muros de suporte de terras e fundações). Assim, por exemplo no caso de uma laje, o esforço axial que se desenvolve devido à restrição da retração do betão é diretamente influenciado pela rigidez da laje (significativamente reduzida após fissuração) e pela força axial necessária para se formar uma nova fenda. Quando a laje axialmente restringida é sujeita à aplicação de cargas verticais, a redução da rigidez associada à formação das fendas de flexão conduz ao decréscimo da força axial necessária à formação de uma nova fenda. Assim, para valores correntes de deformação imposta, o esforço axial de restrição é tanto menor quanto maior for o momento fletor atuante [2, 3]. Embora seja uma situação comum, em estruturas sujeitas a esta combinação de efeitos não existe, até aos dias de hoje, um consenso relativamente à abordagem a adotar no dimensionamento de armaduras para controlo da abertura de fendas no estados limites de utilização (SLS) [4]. Parte desta indefinição prende-se com o desconhecimento que existe em relação às complexas interações que ocorrem entre deformações impostas, viscoelasticidade e esforços de flexão nas estruturas de BA. Como consequência, os códigos de dimensionamento atuais não estabelecem regras inequívocas para cálculo da abertura de fendas nas condições acima referidas, abordando a fissuração causada por cargas externas e por deformações restringidas de forma separada [5-7].

O efeito combinado da deformação impedida e do carregamento externo em lajes de BA tem sido alvo de vários estudos, de cariz numérico e analítico, ao longo dos últimos anos [2, 3, 8, 9]. Estes estudos são fundamentais para o desenvolvimento de modelos e metodologias que permitam prever a evolução dos esforços e das fendas induzidas neste tipo de situações, carecendo, no entanto, de validação experimental. Neste contexto, e no âmbito do projeto FCT IntegraCrete, foi encetado um programa experimental a longo prazo para monitorização do comportamento estrutural, sob o efeito combinado e separado de retração impedida e do carregamento vertical, em provetes que reproduzem um troço de uma laje maciça unidirecional. Paralelamente, foi realizada uma extensa caracterização das principais propriedades mecânicas e higrométricas do betão.

Neste artigo são apresentados os principais resultados obtidos no programa experimental, fornecendo assim uma base de dados importante para validação de modelos com diferentes níveis de complexidade: desde métodos analíticos até simulações numéricas higo-mecânicas. Detalhes adicionais sobre o sistema de restrição desenvolvido e consequente programa experimental podem ser consultados no artigo sobre a conceção do sistema experimental [1], onde é abordada a

realização do ensaio piloto e a preparação da campanha experimental. O método experimental adotado nesta campanha é resumido na Secção 2, sendo os resultados mais relevantes, e a respetiva discussão, apresentados na Secção 3. Na Secção 4 são identificadas as principais conclusões.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

De modo a estudar a influência das diferentes ações que se exercem nas lajes, de forma combinada e individual, o programa experimental incluiu o ensaio simultâneo de 4 situações distintas: (i) a Laje 1 (L1) foi sujeita ao efeito combinado da retração impedida e do carregamento externo correspondente a uma combinação quase-permanente de ações; (ii) a Laje 2 (L2) foi sujeita à retração impedida e a esforços de flexão causados unicamente pelo respetivo peso próprio; (iii) a Laje 3 (L3) foi sujeita ao mesmo nível de carregamento externo da L1, mas sem restrição externa da retração por secagem (apenas restrição interna causada pela armadura longitudinal); (iv) a quarta situação corresponde à total ausência de esforços de flexão e de qualquer tipo de restrição à retração, e foi materializada através de dois provetes complementares de betão simples (PC1 e PC2) que são usados para aferir a retração livre do betão.

O dimensionamento dos lajes L1 a L3 teve como base a simulação de um trecho de uma laje real contínua, suportada por vigas transversais espaçadas de 4.0m, em condições de elevada restrição axial. A laje foi dimensionada para estados limite último e de utilização em pavimentos de categoria A, de acordo com o Eurocódigo [5, 10], mas sem consideração de esforços axiais provocados pela restrição de deformações. O dimensionamento resultou numa laje de 0.10m de espessura, realizada com betão da classe C20/25, armadura longitudinal (A400NR) materializada com  $\phi 8//0.10\text{m}$  (faces superior e inferior) e armadura transversal de distribuição com  $\phi 6//0.25\text{m}$ . Tendo em conta a natureza ativa da restrição aplicada à laje, os ensaios foram realizados em condições de apoio simples, tendo-se definido um vão livre de 2.4m, correspondente à distância entre pontos de momentos fletores nulos (aproximadamente 3/5 do vão de 4.0m da laje real). O comprimento total dos provetes é de 2.6m, tendo-se definido uma largura de 0.5m de forma a garantir um comportamento assimilável a uma laje. Foi ainda definido um entalhe (triângulo com 13mm de base e 8mm de altura) de forma a induzir uma fenda a meio vão em todas as lajes. Os provetes PC1 e PC2 têm 0.5m de comprimento e a mesma secção transversal das lajes, ficando dispostos verticalmente ao lado destes de forma a reproduzir a mesma retração de secagem livre.

O controlo da deformação das lajes L1 e L2 foi realizado através de um sistema de restrição axial, desenvolvido para o efeito, que permitiu que os provetes ficassem sujeitos, simultaneamente, a esforços axiais de restrição, de corte e de flexão (Fig. 1). A deformação da laje foi restringida através de dois atuadores hidráulicos ligados a um dos apoios. Estes apoios foram materializados por varões de aço de 40mm de diâmetro, embebidos transversalmente a meia altura nas extremidades do vão livre da laje e envoltos pelas extremidades da armadura longitudinal através de laços. A força axial aplicada foi medida através de células de carga acopladas entre os atuadores e os olhais que fazem a ligação com o apoio da laje. Este sistema permitiu o ajuste progressivo da força axial atuante na laje, com base na deformação longitudinal medida numa região de controlo (RC) pré-definida (correspondente ao troço central com 1.4m). A deformação na RC foi medida através de 2 transdutores de deslocamento (LVDT), aparafusado a meia altura das faces laterais da laje, numa das extremidades da RC, em contacto com um tubo metálico, que por sua vez estava aparafusado na

outra extremidade da RC e apoiado por um rolamento próximo da zona de contacto com o LVDT. A evolução da abertura das fendas ( $w$ ) foi monitorizada pontualmente com recurso a um microscópio digital portátil.

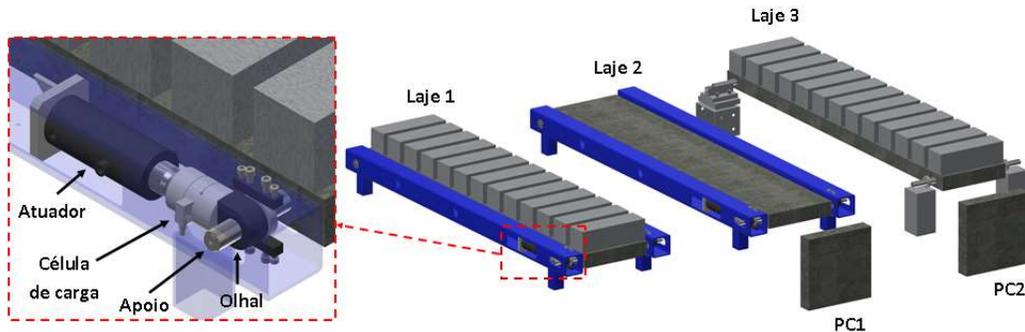


Figura 1. Sistema de restrição axial e provetes ensaiados.

A caracterização do betão compreendeu a realização, em diferentes idades, de ensaios para aferição das resistências à compressão e à tração, do módulo de elasticidade e da fluência [11-15]. Os ensaios de fluência foram realizados em dois provetes cilíndricos (0.3m de altura e 0.15m de diâmetro) para cada idade de carregamento, aos 8 (PF8) e aos 50 dias (PF50). A retração de secagem dos cilindros, subtraída às extensões totais dos provetes para o cálculo da função de fluência, foi medida em provetes idênticos não carregados (PR). Para além da caracterização das propriedades mecânicas, os perfis de humidade relativa (HR) do betão foram determinados de acordo com os procedimentos experimentais propostos por Granja *et al.* [16]. Para o efeito foram betonados dois provetes com  $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$  (H10) para medição das HR a 2, 4 e 5cm de profundidade, e dois provetes com  $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}^3$  (H15) para medição das HR a 2, 4 e 7.5cm de profundidade.

O comportamento estrutural das lajes foi monitorizado de forma contínua ao longo de um período de 18 meses. O faseamento da campanha experimental pode ser sintetizado nos seguintes pontos:

- (i) No dia 17/04/2018 foram betonados os provetes de caracterização e as lajes. Para o efeito, foi encomendado um betão da classe C20/25, com um agregado de dimensão máxima 14mm e uma relação água-cimento (CEM II A/L 42.5R)  $w/c = 0.6$ . O início da mistura do betão corresponde ao instante  $t = 0$  dos resultados que serão apresentados na Secção 3 do presente artigo.
- (ii) Após um período de cura de 7 dias os provetes L, PC, PF8, PF50, PR, H10 e H15 foram descofrados e expostos às condições ambientais da câmara climática, com temperatura e humidade relativa constantes ( $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$  e  $60 \pm 5\%$ , respetivamente).
- (iii) Aos 10 dias começou a ser aplicada carga axial nas lajes L1 e L2, com o intuito de restringir a retração de secagem. O esforço axial aplicado nas duas lajes foi o mesmo até aos 50 dias.
- (iv) Aos 50 dias foi aplicada nas lajes L1 e L3 uma carga vertical correspondente a uma combinação de carga quase-permanente  $p_{cqp} = 2.96 \text{ kN/m}^2$ . Durante este processo a força de restrição aplicada à laje L1 foi reduzida devido à perda de rigidez motivada pelo aumento da fissuração.
- (v) A partir dos 60 dias foi mantido um valor constante de carga axial nas lajes L1 e L2 (57kN e 72kN, respetivamente).

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Caracterização do betão

Os ensaios de caracterização da resistência à compressão do betão foram realizados em provetes cúbicos aos 3, 7 e 28 dias, tendo-se obtido, respetivamente, 21.9, 28.0 e 31.9MPa. A medição de extensões nos provetes PF8, PF50 e PR, para determinação das curvas de fluência, foi feita com extensómetros de corda vibrante, embebidos longitudinalmente no centro dos provetes. Em ambas as idades de carregamento foi aplicada uma tensão constante de 5MPa, correspondente a cerca de 20% da resistência à compressão do betão. Os resultados de caracterização da resistência à tração e do comportamento viscoelástico são apresentados na Fig. 2.

A resistência à tração do betão foi determinada a partir de ensaios de compressão diametral aos 7 e 28 dias, e de ensaios de flexão aos 51 e 499 dias. O valor da resistência à tração uniaxial  $f_{ctm}$  foi estimado através da multiplicação de fatores de conversão  $\alpha_{sp}$  e  $\alpha_{fl}$  pelos resultados experimentais do ensaio de compressão diametral  $f_{ctm,sp}$  e de flexão  $f_{ctm,fl}$ , respetivamente (Fig. 2a). O valor de  $\alpha_{fl}$  foi determinado através da formulação proposta pelo Model Code 2010 (MC10) [7], deduzida de considerações baseadas na mecânica da fratura. A formulação semi-empírica de Malárics e Muller [17] para o cálculo de  $\alpha_{sp}$  foi adotada por conduzir a valores estimados de resistência à tração uniaxial aos 7 e 28 dias, por multiplicação com  $\alpha_{sp}$ , mais coerentes com os valores de tração uniaxial estimados para os 51 e 499 dias, por multiplicação com  $\alpha_{fl}$ .

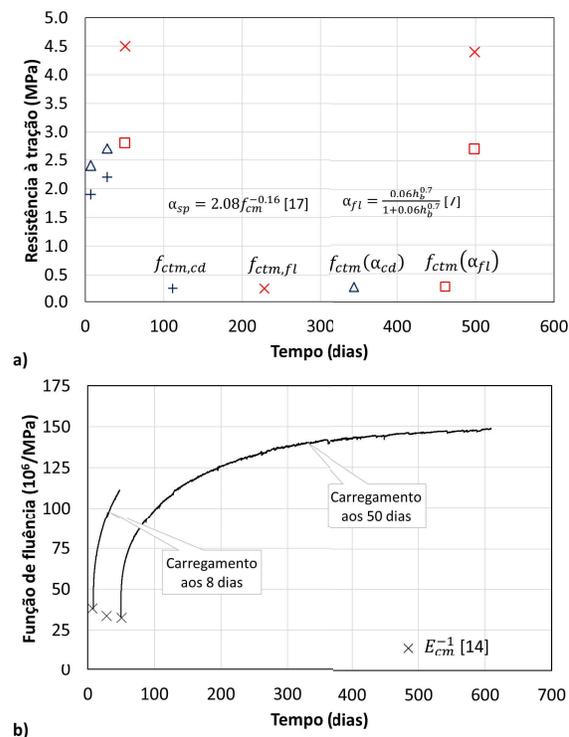


Figura 2. Caracterização do betão: a) resistência à tração; b) fluência e módulo de elasticidade.

Os perfis de HR medidos nos provetes H10 e H15 estão representados na Fig. 3. As primeiras medições realizadas aos 6 dias, antes da descofragem, variaram entre 96% e 100%. Estes resultados

mostram uma perda de humidade pouco significativa durante o período em que o provete esteve selado, tal como seria expectável para um betão com elevada relação água-cimento, em que o processo de secagem por auto dissecação é negligenciável [18].

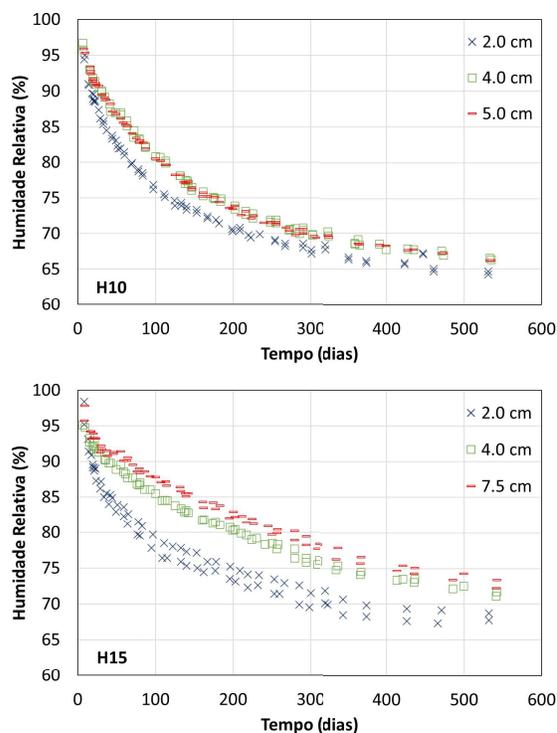


Figura 3. Perfis de HR dos provetes H10 e H15.

Observa-se que ao fim de 1 ano os provetes H10 já se encontram praticamente em equilíbrio com o ambiente ( $HR < 70\%$  para todas as profundidades). O mesmo não acontece com os provetes H15, observando-se ainda que para as mesmas profundidades os valores de HR são superiores aos dos provetes H10. De facto, para provetes mais espessos a HR para a mesma profundidade tende a ser maior devido a um maior fluxo de água que ocorre entre o interior e a superfície dos provetes [19].

### 3.2 Comportamento estrutural das lajes

Na Fig. 4 apresentam-se a força de restrição aplicada a L1 e L2 ( $F_R$ ), a extensão média das lajes na RC ( $\varepsilon_{m,RC}$ ) e a extensão média medida nos PC ( $\varepsilon_m$ ). O desenvolvimento das fendas principais ao longo do tempo (valor máximo de abertura  $w_{max}$ ) é apresentado na Fig. 5. Na Fig. 6 apresentam-se a localização e abertura das fendas principais, em fase de fissuração estabilizada ( $w_{est}$ ), ao fim de 18 meses.

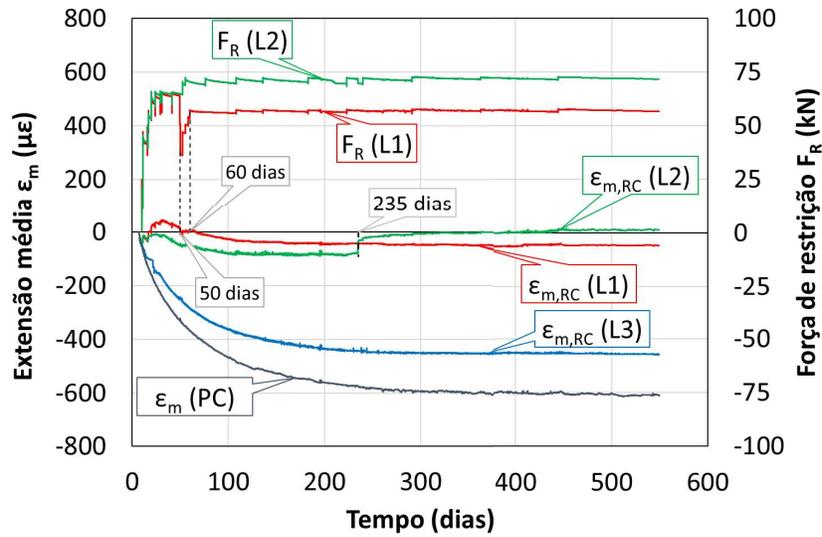


Figura 4. Força de restrição aplicada em L1 e L2 e extensão média medida nos PCs e lajes (RC).

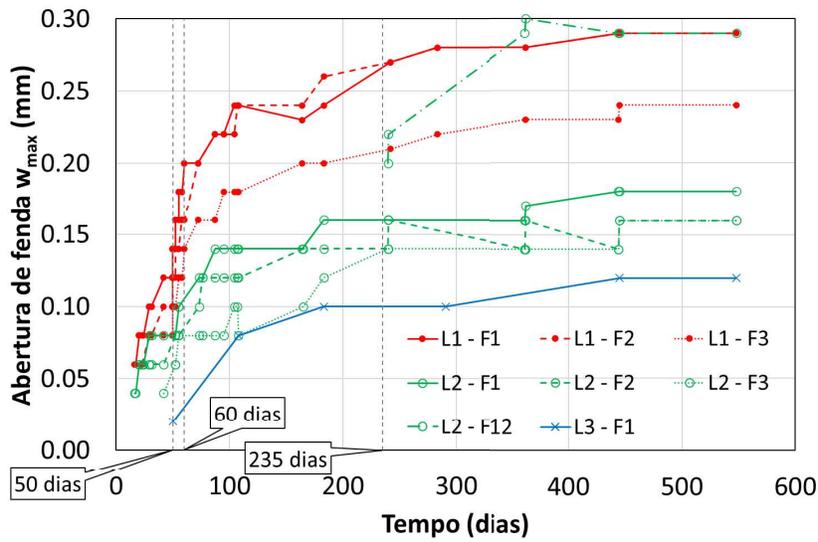


Figura 5. Evolução do valor de abertura máxima nas fendas principais ( $w_{est} > 0.1mm$ ).

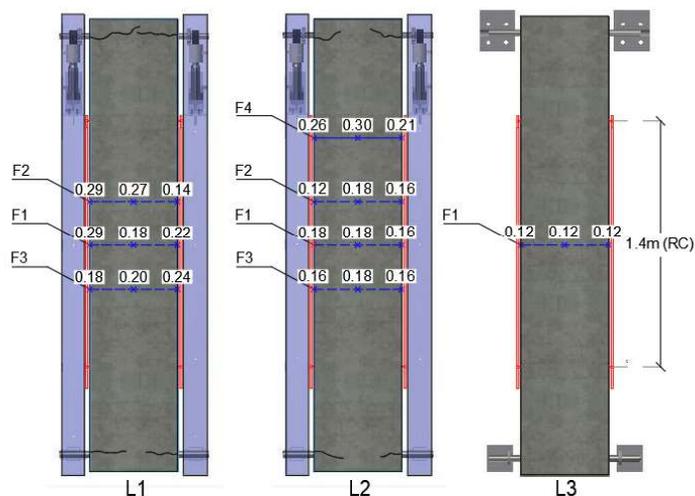


Figura 6. Localização das fendas principais ( $w_{est}$  em mm).

Após a descofragem as 3 lajes ficaram sujeitas às mesmas condições de retração até aos 10 dias, quando se iniciou a restrição da deformação axial das lajes L1 e L2 (Fig. 4). A aplicação da força de restrição induziu o aparecimento das fendas F1, F2 e F3, detetadas aos 16, 23 e 42 dias, respetivamente (Fig. 5). A localização destas fendas é apresentada na Fig. 6, sendo a posição de F1 naturalmente determinada pelo entalhe a meio vão e as posições de F2 e F3, afastadas 0.25m de F1, significativamente influenciadas pelo espaçamento da armadura de distribuição. Observa-se que, apesar de ter sido imposta a mesma força axial de restrição nas lajes L1 e L2 até aos 50 dias, a laje L1 apresentou, durante o mesmo período, uma fissuração maior e, conseqüentemente, um menor encurtamento na RC comparativamente à laje L2. Estes resultados sugerem uma influência significativa de pequenas variações nas propriedades mecânicas (nomeadamente da resistência à tração) entre provetes idênticos da mesma amassadura, na fase de desenvolvimento da fissuração.

Aos 50 dias foram aplicadas as cargas verticais nas lajes L1 e L3, resultando no aumento da abertura das fendas F1 a F3 da laje L1, e no aparecimento da fenda F1 a meio vão na laje L3. Tendo em conta a natureza ativa das condições de restrição das lajes, foi necessário aplicar uma redução da força axial a atuar na laje L1 durante o processo de colocação da carga vertical, de forma a evitar a deformação excessiva ( $\varepsilon_{m,RC} \gg 0$ ) motivada pelo aumento da fissuração. É importante referir que esta diminuição da força de restrição a atuar na laje aconteceria de forma natural numa situação de restrição passiva, devido ao alívio da restrição imposta causada pelo desenvolvimento das fendas de flexão.

A partir dos 60 dias a força de restrição a atuar nas lajes L1 e L2 foi mantida em valores constantes até ao final da campanha experimental. Durante este período os valores da abertura de fendas aumentaram progressivamente em todas as lajes, até à estabilização dos resultados por volta de um ano de idade, altura em que o provete H10 (com a mesma espessura da laje) atinge o equilíbrio com a HR ambiente e a retração livre do PC estabiliza.

Ao longo do primeiro ano foram detetadas fendas superficiais, distribuídas na face inferior ao longo de toda a RC, nas 3 lajes. Ao contrário das fendas principais apresentadas na Fig. 6, o valor de abertura destas fendas não evoluiu ao longo do tempo, apresentando valores inferiores a 0.1mm ao

longo de toda a campanha experimental. Estas fendas resultam, essencialmente, das tensões autoinduzidas originadas pela retração de secagem não-uniforme entre o núcleo e a superfície da laje, manifestando-se na superfície inferior em combinação com os esforços de flexão existentes nessa zona. Apenas uma fenda (F4) foi observada na superfície superior da laje L2. Esta fenda surgiu aos 235 dias (Fig. 5), a 60cm do meio vão, sendo responsável pela variação brusca da extensão média medida na RC da laje L2, no mesmo instante (Fig. 4). Tendo em conta que os momentos flectores a atuar na laje são positivos (apesar de pequenos, dada a proximidade do apoio), o aparecimento desta fenda na superfície superior não era expectável, podendo, no entanto, ser justificado com uma fragilidade pontual da laje na face superior.

Foi ainda caracterizada experimentalmente a evolução temporal das flechas e das extensões nas armaduras, que por motivos de concisão não são aqui apresentados, podendo ser consultados em [20].

A carga axial aplicada nas lajes L1 e L2 permitiu, em ambas, a imposição de elevados níveis de restrição ao longo da campanha experimental. Tendo em conta que as lajes L1 e L3 apresentam um histórico semelhante relativamente à evolução dos esforços de flexão, pode-se estimar, para a laje L1, um grau de restrição global superior a 0.9 ao longo de toda a campanha experimental, com base nas extensões médias da RC ( $\varepsilon_{m,RC}(L1)$  e  $\varepsilon_{m,RC}(L3)$ ) apresentadas na Fig. 4. A carga axial aplicada na laje L1, necessária para garantir o nível de restrição referido (57kN) representa 42% da força de fissuração do betão ( $N_{cr} = A_c f_{ctm} = 135kN$ ), assumindo uma tensão resistente à tração de 2.7MPa. Este valor está em linha com o mais recente estado-da-arte sobre a simulação numérica em lajes sujeitas ao efeito combinado da retração impedida e de cargas externas [2, 8, 9]. Nestes trabalhos a força de restrição induzida nas lajes devido à restrição da retração por secagem varia, para diferentes abordagens, entre 35% e 58% de  $N_{cr}$ .

#### 4 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta os resultados de uma campanha experimental a longo prazo, centrada no estudo do efeito combinado da retração impedida e de cargas externas em lajes de betão armado.

As medições iniciais dos perfis de HR confirmam a tendência de betões com elevada relação água-cimento demonstrarem valores negligenciáveis de secagem devido à auto dissecação do betão [18]. Observou-se ainda, para o provete com 10cm de espessura, que o equilíbrio com a HR do ambiente foi atingido ao fim de um ano, coincidindo com a estabilização da retração livre do betão e, conseqüentemente, da evolução da abertura das fendas. É relevante referir ainda que a retração livre do betão atingiu cerca de 80% do seu valor final ao fim de 3 meses, o que indica que os problemas relacionados com a retração impedida em elementos de espessura reduzida serão, à partida, identificáveis dentro do período de construção da obra.

A percentagem da força de fissuração do betão  $N_{cr}$  necessária para impor um nível elevado de restrição na laje L1 está em linha com os valores observados nos mais recentes estudos sobre a simulação numérica para avaliação do comportamento estrutural de lajes restringidas axialmente e sujeitas a cargas externas.

Os resultados experimentais obtidos configuram uma relevante base para calibração e validação de modelos de análise do comportamento em serviço de lajes de betão armado restringidas.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho é suportado pelos projetos POCI-01-0145-FEDER-007457 (CONSTRUCT) e POCI-01-0145-FEDER-007633 (ISISE), financiados por fundos FEDER através do COMPETE 2020 – Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (POCI), e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia. Agradece-se ainda à FCT o financiamento do projeto IntegraCrete PTDC/ECM-EST/1056/2014 (POCI-01-0145-FEDER-016841) e da bolsa de doutoramento SFRH/BD/148558/2019.

## REFERÊNCIAS

- [1] Gomes, J., Azenha, M., Granja, J., Faria, R., Sousa, C., Zahabizadeh, B., Behbahani, A., Schlicke, D., Rodrigues, C. (2018) Método experimental para o estudo do efeito combinado de cargas aplicadas e retração impedida em lajes de betão armado. Encontro Nacional de Betão Estrutural 2018, LNEC, Lisboa, Portugal, pp. 172-181.
- [2] Camara, J., Luís, R. (2006) Structural response and design criteria for imposed deformations superimposed to vertical loads. The Second fib Congress 2006, Naples, Italy, pp. 1-12.
- [3] Schlicke, D., Tue, N.V. (2016) Crack width control—verification of the deformation compatibility vs. covering the cracking force. MSSCE2016 Service Life Segment, Lyngby, Denmark.
- [4] Azenha, M., Granja, J. (2017) Seminar: Design of reinforcement for RC elements under the combined effect of applied loads and restrained shrinkage. E-book of presentations. <http://doi.org/10.5281/zenodo.800693>
- [5] CEN. (2004) EN 1992-1-1: 2004/AC:2010 Eurocode 2 Design of Concrete Structures Part1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, CEN.
- [6] CEN. (2006) EN 1992-3: 2006 Eurocode 2 Design of Concrete Structures Part 3: Liquid retaining and containment structures. Brussels, CEN.
- [7] FIB (2013) fib Model code for concrete structures 2010. Berlin, Germany, Ernst & Sohn.
- [8] Gomes, J., Carvalho, R., Sousa, C., Granja, J., Faria, R., Schlicke, D., Azenha, M. (2020) 3D numerical simulation of the cracking behaviour of a RC one-way slab under the combined effect of thermal, shrinkage and external loads. Engineering Structures, 212. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110493>
- [9] Sousa, C., Felisberto, E., Faria, R. (2016) Influence of restrained shrinkage in RC building slabs: a case study. MSSCE2016 Service Life Segment, Lyngby, Denmark.
- [10] CEN. (2002) EN 1991-1-1: Eurocode 1 Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings. Brussels, CEN.
- [11] ASTM. (2002) C512-02 Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression. ASTM, West Conshohocken, U.S.

- [12] CEN. (2009) EN 12390-3 Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. Brussels, CEN.
- [13] CEN. (2009) EN 12390-6 Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens. Brussels, CEN.
- [14] CEN. (2013) EN 12390-13 Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression. Brussels, CEN.
- [15] Vandewalle L. (2002) Recommendations of RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: bending test. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, 35:579-582. doi: 10.1617/13884.
- [16] Granja, J., Azenha, M., Sousa, C., Faria, R., Barros, J. (2014) Hygrometric Assessment of Internal Relative Humidity in Concrete: Practical Application Issues. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(8):250-265. <https://doi.org/10.3151/jact.12.250>
- [17] Malárics, V., Müller, H.S. (2010) Evaluation of the splitting tension test for concrete from a fracture mechanical point of view. 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures 2010; Seoul, Korea, pp. 709-716.
- [18] Kim, J.K., Lee, C.S. (1998) Prediction of differential drying shrinkage in concrete. *Cement and Concrete Research*, 28(7), 985-994. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00077-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00077-5)
- [19] Azenha, M., Leitão, L., Granja, J.L., Sousa, C., Faria, R., Barros, J.A.O. (2017) Experimental validation of a framework for hygro-mechanical simulation of self-induced stresses in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 80, 41-54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.008>
- [20] Gomes, J., Granja, J., Sousa, C., Zahabizadeh, B., Faria, R., Schlicke, D., Azenha, M. A new test setup for simulation of the combined effect of bending and axial restraint in slab-like specimens. *Engineering Structures*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111251>