

## **Concepção de sistemas de restrição passiva à retracção para avaliação das tensões associadas à deformação impedida**



**Rodrigo Lameiras<sup>1</sup>**



**Miguel Azenha<sup>2</sup>**



**Joaquim Barros<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

As tensões associadas à retracção do betão em estruturas laminares sujeitas a restrições ao seu movimento livre originam, frequentemente, patologias que podem comprometer a durabilidade da estrutura. Esta problemática é recorrente em pavimentos de edifícios industriais e em camadas de betão utilizadas na reparação e no aumento da capacidade de carga de pavimentos de betão.

O comportamento do betão quando sujeito a condições de impedimento parcial ou total à retracção é usualmente avaliado com recurso a ensaios qualitativos de fissuração. Apesar desses ensaios serem úteis para realizar comparações do quão propensos à fissuração são distintos tipos de betões, eles não permitem estudar o mecanismo de forma quantitativa, o que é essencial para o desenvolvimento de novas estratégias e produtos que visem mitigar o problema da fendilhação do betão associado às deformações impedidas. Assim, no presente trabalho são propostos e implementados dois métodos de ensaio para avaliação, de forma quantitativa, das tensões auto-induzidas nos betões, tendo-se para tal utilizado um betão auto-compactável reforçado com fibras de aço. Neste trabalho são descritos os ensaios piloto efectuados e apresentados e comentados os resultados preliminares.

### **PALAVRAS-CHAVE**

retracção, fendilhação, tensões auto-induzidas

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [rmlameiras@civil.uminho.pt](mailto:rmlameiras@civil.uminho.pt)

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [miguel.azenha@civil.uminho.pt](mailto:miguel.azenha@civil.uminho.pt)

<sup>3</sup> Universidade do Minho, Depart. de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [barros@civil.uminho.pt](mailto:barros@civil.uminho.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

A fendilhação do betão associada às tensões decorrentes da restrição às deformações de retracção (autogénea e/ou de secagem) é um fenómeno bem conhecido do meio técnico e científico. O interesse por esse assunto foi renovado recentemente devido ao desenvolvimento de betões de alta resistência, com baixas relações água/cimento, os quais são mais sensíveis à fissuração associada à retracção autogénea impedida, particularmente durante as primeiras idades [1-3]. O emprego de novas técnicas de controlo da fendilhação, tais como o uso de aditivos redutores de retracção [4-5], assim como o emprego de fibras dispersas na matriz cimentícia [6-9] também vieram aumentar o interesse pelo assunto.

Com o intuito de otimizar o uso e o projecto com esses novos materiais é fundamental que se compreenda bem os mecanismos de ocorrência e controlo da fissuração envolvidos. Devido à complexidade desses fenómenos, os mesmos não podem ser avaliados através da abordagem simplificada onde a sensibilidade à fissuração é quantificada com base somente na retracção livre do betão. Assim, é fundamental determinar as tensões desenvolvidas no betão e determinar o risco de fissuração por intermédio de critérios de fractura, o que torna fundamental desenvolver, testar e simular os mecanismos sob condições de restrição das deformações do betão [10].

No âmbito dos ensaios para avaliar o comportamento do betão sob retracção impedida, os ensaios qualitativos têm sido os mais utilizados, como é o caso do ensaio do anel [7, 11-13]. Apesar de serem ensaios relativamente simples e úteis para avaliar o potencial de fissuração de diferentes misturas de betão, os resultados fornecidos por esse tipo de teste não são suficientes para estudar o mecanismo de fissuração [16]. Com o intuito de contornar essa limitação, vários estudos passaram a utilizar ensaios quantitativos. De entre eles destacam-se os que se baseiam em sistemas de restrição passiva [9, 15-18] e os que recorrem a sistemas de restrição activa [19-21]. No entanto, enquanto os ensaios mais simplificados possuem dificuldades para impor restrição às extremidades dos provetes de betão, os ensaios com sistemas de restrição activa são demasiadamente caros e laboriosos, o que dificulta a realização de vários ensaios em simultâneo.

Assim, no presente trabalho pretende-se avaliar as potencialidades e as deficiências de dois ensaios de relativa fácil execução e baixo custo, concebidos para a avaliação do comportamento à retracção impedida dos betões. Os sistemas aqui propostos são baseados em mecanismos de restrição passiva e contornam algumas das limitações de sistemas anteriormente propostos, sendo caracterizados por serem quantitativos, lineares e com retracção parcialmente impedida. Através deles é possível determinar as tensões auto-induzidas nos betões e observar a capacidade do betão dissipar essas tensões de tracção associadas à deformação parcialmente impedida.

## **2. DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS PROPOSTOS**

Nesse trabalho são propostos dois sistemas de restrição linear à deformação: um baseado num perfil HEA para conferir restrição e outro baseado num perfil tubular. Estes sistemas são do tipo longitudinal passivo e foram devidamente instrumentados para que seja possível obter as deformações no elemento restritor. A partir das deformações medidas é possível estimar a tensão no elemento restritor e, por equilíbrio de forças, avaliam-se as tensões instaladas no elemento restringido (betão). Optou-se por esta tipologia de ensaios visto ser de relativa fácil execução, quando se toma por base de comparação os sistemas em que a restrição é provocada por sistemas activos, como por exemplo actuadores hidráulicos. De facto, se for tido em conta que cada ensaio pode demorar meses, os custos elevados dos sistemas de restrição activa torna-os muito pouco adequados para programas experimentais que envolvam várias composições em simultâneo. Os dois sistemas propostos diferem quer na forma de ligação do provete ao elemento restritor, quer na forma do provete em análise.

## 2.1 Sistema baseado no perfil HEA

Este sistema foi parcialmente baseado no anteriormente concebido por Carlswård [9]. O esquema da montagem experimental utilizado pode ser observado na Fig. 1 e é composto por um tramo de perfil HEA 160 com 1400mm de comprimento e duas abas metálicas laterais aparafusadas aos banzos do perfil, que constituem a cofragem dos provetes. Neste ensaio são utilizados provetes de betão de 1000mm de comprimento e secção transversal com 100mm de altura por 45mm de largura (na zona de ligação ao perfil HEA). Ao longo de 800mm da parte central do provete, a espessura da sua secção foi reduzida em 10mm, ficando com 35mm. Esta redução de secção dos provetes é obtida através de placas de aço amovíveis com 10mm de espessura e 800mm de comprimento posicionadas junto aos banzos do perfil antes da realização da betonagem. Os mecanismos de solidarização entre o provete e a cantoneira de ligação ao HEA são constituídos por três barras roscadas de 10mm de diâmetro e 75mm de comprimento de embimento, posicionadas conforme pode ser visto na Fig. 1. A redução de secção na zona central do provete evita concentração de tensões nas extremidades deste, as quais possuem inclusões associadas às barras roscadas utilizadas para materializar a ligação do provete à cantoneira na extremidade. As cantoneiras são em aço com dimensões 80×45mm e 20mm de espessura, distanciadas longitudinalmente de 1000mm entre si. A fixação das barras roscadas às cantoneiras e a ligação das cantoneiras aos banzos do perfil é feita através de ligações aparafusadas.

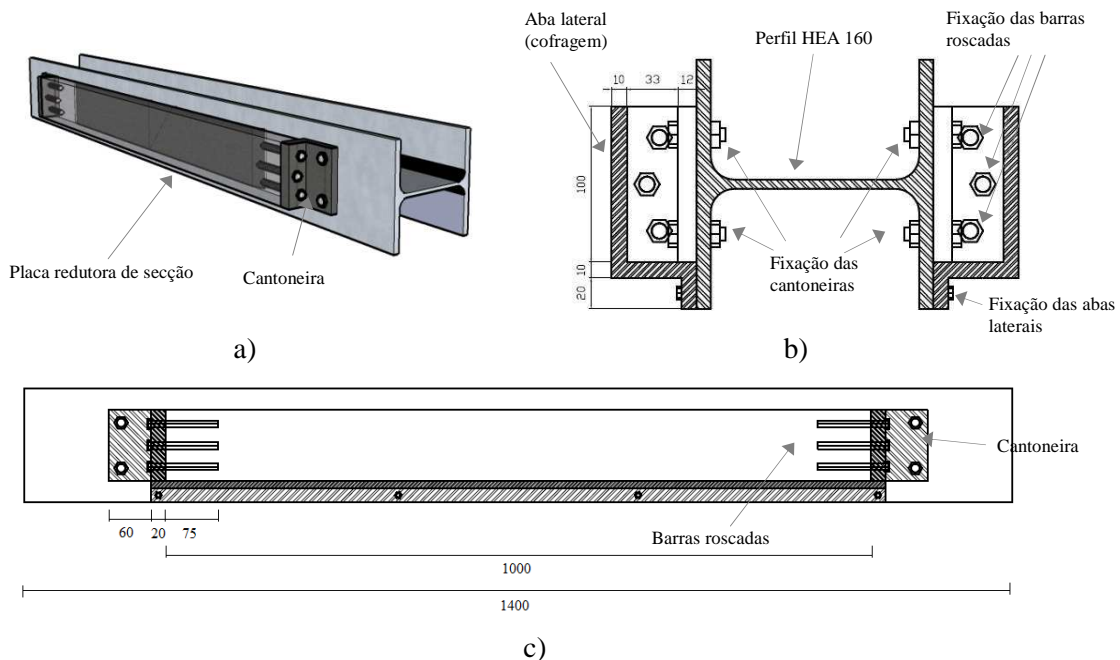


Figura 1. Esquema do ensaio proposto baseado em perfil HEA (os provetes de betão não estão representados): a) perspectiva; b) vista de topo; c) corte longitudinal. (medidas em milímetros).

Antes da betonagem é passado óleo na cofragem para facilitar a desmoldagem. A betonagem é feita com a maior dimensão do sistema na posição horizontal e, em seguida, as superfícies de betão são cobertas por folhas de plástico. Vinte e quatro horas após a betonagem, as folhas de plástico são removidas, bem como as placas laterais que servem de cofragem e as placas redutoras de secção posicionadas entre os provetes de betão e os banzos do perfil HEA. O aparelho é então posicionado com a sua maior dimensão na vertical, conforme se apresenta na Fig. 2a, e as faces paralelas à alma do perfil são seladas com parafina para que se garantam fluxos de secagem unidireccionais. A avaliação das tensões no betão é realizada indirectamente através da monitorização de extensões na parte central da alma do perfil HEA com recurso a extensómetros eléctricos colados (Fig. 2b).

As principais diferenças do sistema descrito em relação ao originalmente proposto por Carlswård são: (i) efectua-se a medição das tensões no betão de forma indirecta através da instrumentação do perfil

*Concepção de sistemas de restrição passiva à retracção para avaliação das tensões associadas à deformação impedida*

metálico, tornando-o num ensaio quantitativo; (ii) betonam-se dois provetes num mesmo perfil metálico, em posição simétrica, de forma a diminuir a probabilidade de ocorrência de deformações de flexão no perfil.

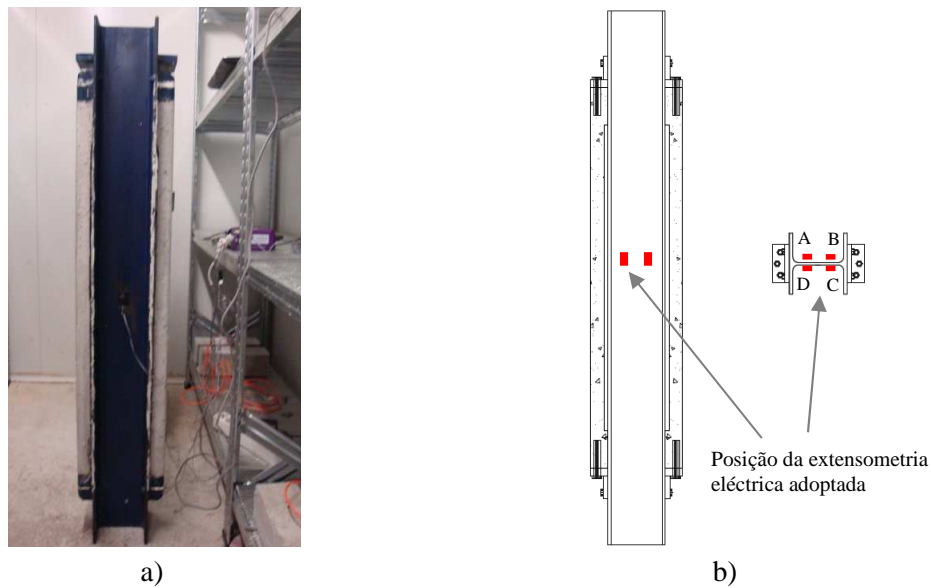


Figura 2. Sistema proposto baseado em perfil HEA. a) Sistema em funcionamento; b) detalhe da extensometria eléctrica adoptada.

## 2.2 Sistema tubular

O presente sistema de ensaio, ilustrado esquematicamente na Fig. 3, consiste numa peça de betão com forma análoga a um osso, na medida em que é alongada, tem secção transversal cilíndrica na zona central (150mm de diâmetro) e aumenta de secção junto às extremidades (primeiro com forma tronco-cónica, e depois com forma cilíndrica de 219.9 mm de diâmetro). O aumento de secção nas extremidades tem como finalidade permitir a compatibilização com uma peça metálica que serve de molde ao provete de betão, e que, simultaneamente, serve para conexão da extremidade da peça em betão a três elementos restritores longitudinais (troços de tubo metálico) axialmente centrados com o provete (ver Fig. 3b).

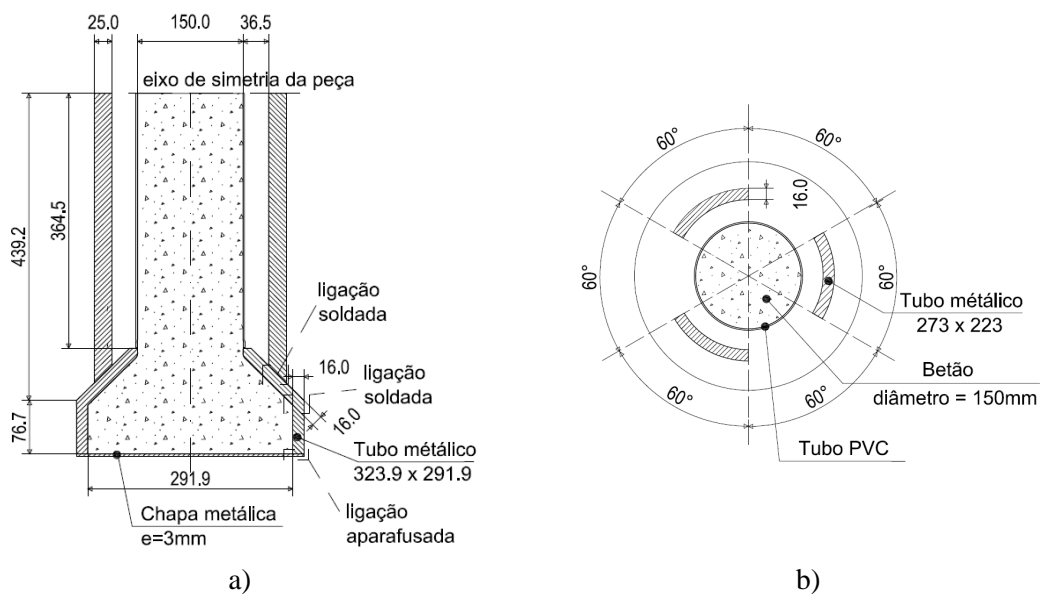


Figura 3. Esquema correspondente ao sistema tubular proposto: a) Corte longitudinal; b) corte transversal. (medidas em milímetros).

A betonagem é feita na vertical através de uma das extremidades da peça, sendo que a cofragem da zona central cilíndrica do provete de betão é garantida por um tubo de PVC que é removido posteriormente para permitir a secagem deste. Na Fig. 4a pode ser observada uma fotografia do sistema tubular durante o ensaio.

A avaliação das tensões instaladas no betão é efectuada a partir da medição das extensões longitudinais do elemento restritor, conforme é apresentado na Fig. 4b. A monitorização das extensões foi realizada com recurso a extensómetros colados nas superfícies externas e internas dos três braços restritores, a meia altura destes.

Pode-se apontar como aspecto positivo do sistema tubular o facto da cofragem fazer parte do sistema de restrição e servir para a leitura das deformações, não existindo peças aparafusadas (todos os elementos constituintes do sistema foram ligados por soldadura) que poderiam induzir folgas, com consequente diminuição das condições de restrição oferecidas pelo sistema desenvolvido. Assim, é possível realizar as primeiras aquisições de dados logo após a betonagem. Todavia, no caso do estudo da retracção em betão reforçado com fibras (BRF), especialmente com fibras rígidas e em material de massa específica superior à dos restantes constituintes do betão, como é o caso das fibras de aço (BRFA), a orientação e distribuição preferencial assumida pelas fibras durante a betonagem do provete em causa poderá não representar a orientação e distribuição das fibras numa dada aplicação a estudar.

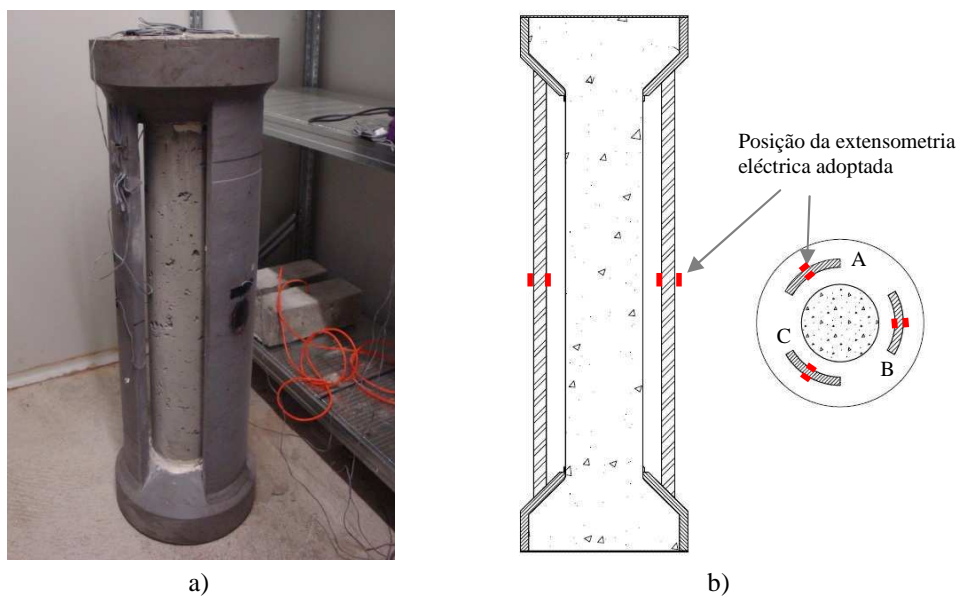


Figura 4. Sistema tubular proposto. a) Sistema tubular em funcionamento; b) detalhe da extensometria eléctrica adoptada.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental piloto foi conduzido com um betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA). As proporções da mistura do betão utilizado são apresentadas no Quadro 1, sendo de 12mm a dimensão máxima do inerte. As areias são de origem quartzítica. A fibra utilizada é de aço trefilado com extremidades dobradas, de 35 mm de comprimento e 0.5 mm de diâmetro, a que corresponde um factor de forma de 70. Foi utilizado um aditivo superplastificante Viscocrete 3002HE da Sika para alcançar as características de auto-compactabilidade desejadas.

*Concepção de sistemas de restrição passiva à retracção para avaliação das tensões associadas à deformação impedida*

Logo após a betonagem as superfícies livres dos provetes foram cobertas com uma membrana plástica, sendo os provetes mantidos numa câmara climática sob condições de temperatura (T) e humidade (HR) constante durante todo o ensaio: T=20°C; HR=60%.

Quadro 1 – Quantidades dos materiais utilizados no fabrico de betão de 1 m<sup>3</sup> de BACRFA.

<i>Relação Pasta/total</i>	<i>Cimento CEM II 42.5 R (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Água (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Superplas- tificante (dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Fíler Calcário (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Areia Fina (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>1/2 Areia (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Brita (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Fibras (kg/m<sup>3</sup>)</i>
0,38	401,68	115,23	7,65	344,30	257,71	727,52	429,99	45,00

Dois provetes com dimensões correspondentes às dos tramos livres das duas configurações de ensaio (800x100x35mm e  $\phi$ 150x800mm) foram utilizados para determinar as extensões de retracção livre, mantendo condições de secagem idênticas às dos sistemas restringidos com recurso a selagem de faces com parafina. As deformações foram determinadas através de extensómetros de embeber próprios para uso em betão posicionados nos centros dos provetes. No provete correspondente ao sistema HEA foi adoptado um extensómetro de resistência eléctrica de embeber da série EGP da VISHAY. No provete correspondente ao sistema tubular utilizou-se um sensor de cordas vibrantes tipo TES/5.5/T da Gage Technique International.

A aquisição e armazenamento de todos os dados foram iniciados 36 horas após a betonagem e foram realizados de forma automática com intervalos de 1 minuto, utilizando um sistema de aquisição Datataker DT80G. Os dados obtidos foram ajustados com recurso ao procedimento de Loess [22]. De referir que devido a uma falha eléctrica no período compreendido entre 115h e 305h após a betonagem, foram perdidos os resultados da monitorização nesse período, pelo que não aparecem representados nos gráficos desta publicação. Nesta fase preliminar de avaliação dos sistemas restritores, foi considerado um tempo total de ensaio de 550 horas (cerca de 23 dias).

As tensões médias nos provetes de betão para ambos os sistemas restritores foram determinadas através da seguinte equação

$$\sigma_b = \left( \frac{A_a}{A_b} \cdot E_a \right) \cdot \varepsilon_a^* \quad (1)$$

que resulta do equilíbrio entre a força exercida pelo betão e a força exercida pelo aço (sistema auto-equilibrado), sendo  $\sigma_b$  a tensão na secção central do provete de betão,  $A_a$  a área correspondente à secção transversal do elemento restritor em aço,  $A_b$  a área correspondente à secção transversal de betão,  $E_a$  o módulo de elasticidade do aço e  $\varepsilon_a^*$  a deformação no aço determinada por extensometria eléctrica. Para o sistema baseado no perfil HEA  $A_a$  é a área correspondente à secção transversal do perfil HEA (3880mm<sup>2</sup>) e  $A_b$  é a soma das áreas das secções transversais de dois provetes de betão (2 × 35 × 100 mm<sup>2</sup>). Para o sistema tubular  $A_a$  é a área de aço correspondente à soma das áreas das secções transversais dos elementos restritores longitudinais (9738,94 mm<sup>2</sup>) e  $A_b$  é a área da secção transversal da zona cilíndrica de betão (17671,5 mm<sup>2</sup>). Como a relação  $A_a/A_b$  é a mesma para os dois sistemas e o módulo de elasticidade dos aços dos aparelhos é 210 GPa, os multiplicadores ( $A_a/A_b \cdot E_a$ ) utilizados para transformar directamente deformações medidas no elemento restritor em microstrain em tensões no betão em MPa têm o mesmo valor e são iguais a 0,116 MPa para os dois casos.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 Retracção livre

As deformações obtidas nos provetes moldados para avaliar a retracção livre são apresentadas na Fig. 5. Como seria de esperar, devido à maior área de contacto com o exterior face à área da sua secção transversal, o provete correspondente ao ensaio HEA sofreu maiores extensões de retracção de secagem, resultando num valor de encurtamento final globalmente superior ao do ensaio tubular.

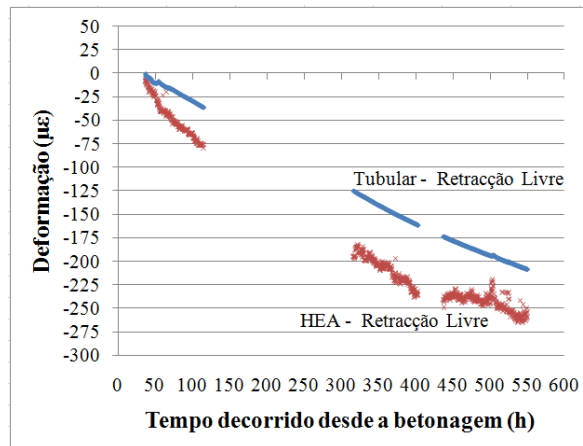


Figura 5. Deformações decorrentes das retracções livres.

### 4.2 Sistema baseado no perfil HEA

A deformação obtida na alma do perfil HEA é a que se apresenta na Fig. 6a. A diferença verificada entre os sensores HEA-A e HEA-C apontam para a hipótese de ter havido flexão do perfil HEA. O despiste deste tipo de situação poderia ter sido feito caso houvesse resultados de extensometria para outras localizações no perfil. De facto, no presente trabalho haviam sido monitorizados outros três pontos da viga HEA que, no entanto, não puderam ser utilizados devido a anomalias detectadas no funcionamento desses extensómetros. Presumindo como plausível a média dos sensores HEA-A e HEA-C como representativa da extensão axial do elemento restritor, é possível concluir que a extensão à idade de 550h era de -25,8 microstrain. Convertendo esta extensão em tensão no betão, de acordo com a equação (1), obtém-se o valor de 2,99MPa. Trata-se de uma tensão relativamente elevada, evidenciando a capacidade do sistema experimental proposto em oferecer suficiente restrição de deformação para possibilitar a fissuração dos elementos em estudo. No entanto, é de realçar que a rigidez axial do elemento restritor necessária para garantir este nível de tensão no betão conduziu a níveis de extensão no aço bastante baixos (inferior a 50 microstrain). Isto coloca dificuldades aos sistemas usuais de medição baseados em extensometria, que chegam a ter ruído no sinal que causa oscilações de ~10 microstrain. Nas próximas implementações deste sistema, serão adoptados extensómetros de corda vibrante na monitorização das extensões do elemento restritor, dado que conduzem a sinal mais estável e com referência absoluta em relação à extensão inicial (ao contrário do que acontece em extensometria eléctrica em que apenas é medida uma variação de extensão).

### 4.3 Sistema tubular

Relativamente às deformações medidas nos elementos restritores do sistema tubular, apenas serão apresentadas e discutidas as correspondentes ao braço A (Fig. 6b), uma vez que ocorreram problemas nos extensómetros localizados nos restantes braços (B e C). Assim sendo, não podem ser tiradas ilações acerca do equilíbrio da restrição concedida pelos 3 braços. No entanto, efectua-se uma breve interpretação dos resultados para o caso de se pressupor que as extensões nos braços B e C são idênticas às registadas no braço A. Por análise das extensões registadas nos sensores A-Int (internamente) e A-Ext (externamente) verifica-se a existência de diferenças que indiciam a

## Concepção de sistemas de restrição passiva à retracção para avaliação das tensões associadas à deformação impedida

ocorrência de flexão no braço. Também se constata que a extensão média às 550h de idade é de -30,4 microstrain, o que corresponde a uma tensão no betão de 3,5MPa. Tendo em conta que o grau de restrição é idêntico (ver Secção 3) e que a retracção livre é menor para o caso da secção circular (ver Fig. 5), seria expectável que o nível de tensão no betão no sistema tubular fosse menor que no caso do sistema baseado no perfil HEA. Poderia ter-se tirado ilações diferentes caso se tivesse acesso aos resultados da extensometria nos outros dois braços e se fosse melhor compreendido o que se passou com os resultados apresentados entre os instantes 115h e 305h, visto que antes desse intervalo as leituras nos dois sensores praticamente coincidiam e após tal período apresentaram-se distanciadas de aproximadamente 25 microstrain.

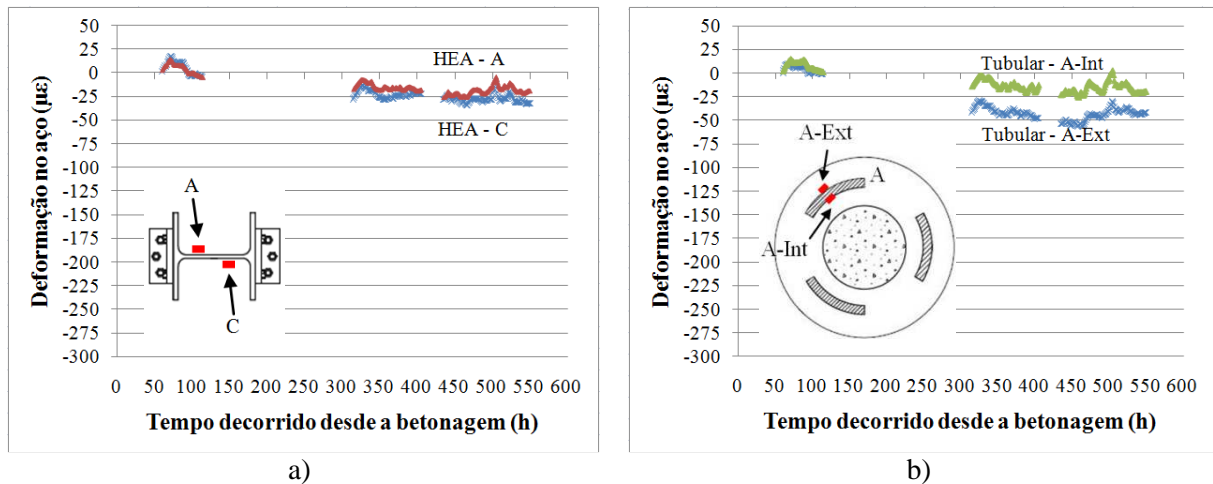


Figura 6. Deformação medida no aço obtida com os sistemas restringidos. a) Sistema baseado no perfil HEA – sensores HEA-A e HEA-C; b) sistema tubular – braço A.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram apresentadas duas propostas de sistemas para avaliação quantitativa do nível de tensão instalado em provetes de betão quando sujeitos a impedimentos à deformação de retracção. Ambos os sistemas propostos baseiam-se na restrição passiva à deformação longitudinal do provete em estudo, utilizando-se para tal elementos metálicos restritores, nos quais é monitorizada a evolução da deformação. Por equilíbrio de forças é possível estimar a tensão instalada no provete. Nesta publicação apresentam-se os resultados preliminares relativos a ambos os sistemas: (i) sistema baseado em perfil HEA; (ii) sistema baseado em perfil tubular. A vantagem das metodologias apresentadas fundamenta-se na simplicidade de implementação e baixo custo do sistema, permitindo a avaliação simultânea de várias composições sem necessidade de grande investimento em recursos humanos e financeiros para a execução deste tipo de ensaios.

Os sistemas de restrição passiva têm, no entanto, uma limitação fundamental que está relacionada com o seu princípio de funcionamento, e que obriga ao estabelecimento de soluções de compromisso mediante o nível de tensão que se pretende atingir. Caso sejam pretendidos níveis de tensão suficientemente elevados para poder chegar a tensões próximas da resistência à tracção do betão (tipicamente entre 2,5 a 5MPa), é necessário ter elementos restritores bastante rígidos, o que traz a consequência das extensões do elemento restritor ficarem a níveis muito baixos (inferior a 100 microstrain), logo difíceis de monitorizar. Por outro lado, caso se pretenda ter níveis de extensão mais elevados nos elementos restritores, fica-se limitado a restrições baixas que conduzem a tensões muito baixas no betão, o que limita as ilações que podem ser tiradas dos resultados colhidos. No que respeita aos sistemas implementados, optou-se por níveis de restrição elevados, conduzindo a dificuldades na medição de extensões. Está previsto portanto o recurso a sensores de deformação de cordas vibrantes devido à sua maior precisão de leitura.



Relativamente a aspectos específicos a cada um dos dois sistemas implementados, concluiu-se o seguinte:

- As diferenças registadas nas extensões medidas nos sensores aplicados no sistema baseado em perfil HEA indiciam ter ocorrido flexão . Será efectuado um novo programa experimental com mais sensores para verificação da relevância deste fenómeno e avaliação das suas consequências na restrição aos dois elementos de betão.

- No sistema baseado em perfil tubular foram verificadas algumas dificuldades de ordem prática durante a betonagem, particularmente na garantia do correcto posicionamento da cofragem de PVC, bem como a sua remoção. Por outro lado, os valores distintos de extensões no mesmo braço indiciam a ocorrência de flexão nestes elementos, o que a confirmar-se significa deficiências na concepção do sistema, particularmente na ligação dos elementos restritores à peça de extremidade que, idealmente, deveria ser rotulada. No entanto, essa implementação poderá trazer problemas quer ao nível da ocorrência de folgas, quer ao nível dos custos de execução deste tipo de aparelho.

Como conclusão final, considera-se ainda ser necessário proceder a adaptações aos procedimentos de ensaio de acordo com os problemas identificados antes de se poder considerar que os sistemas propostos possam ser aplicados como metodologia experimental de apoio à caracterização de betões sob retracção restringida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradece-se à ADI pelo apoio financeiro através do financiamento do projecto LEGOUSE - “Pré-fabricação Modular de Edifícios de Custos Controlados”. O suporte financeiro da FCT é também reconhecido quer pela bolsa individual de doutoramento concedida ao primeiro autor (SFRH/BD/64415/2009), quer pelo projecto de investigação PTDC/ECM/099250/2008 – SeLCo – “Comportamento em serviço de estruturas de betão: uma abordagem multi-física das tensões auto-induzidas”. Também se agradece à SECIL (Central da Unibetão de Celeirós) o fornecimento do BACRFA.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] JUSTENS, H.; VAN GEMART, A.; VERBOVEN, F.; SELLEVOLD, E.J. Total and external chemical shrinkage of low w/c ratio cement pastes, *Adv. in Cem. Res.*, 8 (31), (1996) 121-126.
- [2] BLOOM, R.; BENTUR, A. Free and Restrained Shrinkage of Normal and High-Strength Concretes, *ACI Materials Journal*, 92 (2), 1995, 211-217.
- [3] BROOKS, J.J.; MEGAT JOHARI, M.A. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete, *Cement and Concrete Composites*, 23 (6) (2001), 495–502.
- [4] GETTU, R.; RONCERO, J.; MARTIN, M.A. Study of the behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures subjected to long-term drying, *ACI-Special Publication Concrete: Materials Science Applied*, 206 (2002), 157–166.
- [5] RONGBING, B.; JIAN, S., Synthesis and evaluation of shrinkage-reducing admixtures for cementitious materials, *Cement and Concrete Research* 35 (3) (2005), 445–448.
- [6] GROTH, P., Fibre reinforced concrete: fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, Luleå, Sweden, 2000.

- [7] VOIGT, T.; BUI, V.K.; SHAH, S.P., Drying Shrinkage of Concrete Reinforced with Fibers and Welded-Wire Fabric, *ACI Materials Journal*, 101 (3), (2004), 233-241.
- [8] TOLEDO FILHO, R.D.; GHAVAMI, K.; SANJUÁN, M.A.; ENGLAND, G.L. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. *Cement and Concrete Composites*, 27 (5) (2005), 537-546.
- [9] CARLSWÄRD, J. Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self compacting concrete overlays: test methods and theoretical modeling. Doctoral Thesis, Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology. 2009, Luleå, Sweden.
- [10] BENTUR, A., Early age shrinkage and cracking in cementitious systems. In: Baroghel-Bouny, V.; Aïtcin, P.-C., Editors, *Shrinkage of Concrete Shrinkage 2000*, International RILEM Workshop, RILEM Publications, Paris, France (2000), 1-20.
- [11] SHAH, S.P.; MARIKUNTE, S.; YANG, W.; BECQ-GIRAUTION, E.A. Method to predict shrinkage cracking of concrete, *ACI Materials Journal*, 94 (4), (1998) 339-346.
- [12] WEISS, W.J.; YANG, W.; SHAH, S.P. Shrinkage cracking of restrained concrete slabs. *Journal of Engineering Mechanics - ASCE*, 124 (7), (1998), 765-774.
- [13] SEE, H.T.; ATTIOGBE, E.K.; MILTENBERGER, M.A., Shrinkage cracking characteristics of concrete using ring specimens, *ACI Materials Journal*, 100 (3), (2003), 239-245.
- [14] BENTUR, A., Early age cracking tests. In: A. Bentur, Editor, *Early Age Cracking in Cementitious Systems*, Report of RILEM Committee TC 181-EAS, RILEM Publications Sarl, Bagneux, France (2002), 241–255.
- [15] BLOOM, R.; BENTUR, A. Free and Restrained Shrinkage of Normal and High-Strength Concretes, *ACI Materials Journal*, 92 (2), 1995, 211-217.
- [16] WEISS, J.; SHAH, S.P., Restrained shrinkage cracking: the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry, *Materials and Structures*, v. 35, (2002), 85-91.
- [17] HOSSAIN, A.B.; WEISS, J., The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test, *Cement and Concrete Research*, 36 (1), (2005), 189-199.
- [18] AZENHA, M.A.D. Numerical simulation of the structural behavior of concrete since its early ages. Doctoral Thesis, Faculty of Engineering, University of Porto. 2009, Porto, Portugal.
- [19] KOVLER, K. Testing system for determining the mechanical behavior of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage. *Materials and Structures*. 27 (170) (1994), 324–330.
- [20] ALTOUBAT, S.A. and D.A. LANGE. Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age, *ACI Materials Journal*. 98 (4) (2001), pp. 323–331.
- [21] HAMANAGA, Y.; SATO, Y.; OTANI, T.; UEDA K.; KIYOHARA C. Development of a new apparatus for concrete shrinkage cracking test. *Reports of the Faculty of Engineering, Oita University*, (53) (2006), 33-37.
- [22] CLEVELAND, W.S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*. 74 (1979), 829-836.