

# DISPOSITIVO EXPERIMENTAL PARA CARATERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DO BETÃO SOB A AÇÃO DA RETRAÇÃO RESTRINGIDA

## EXPERIMENTAL DEVICE TO CHARACTERIZE THE VISCOELASTIC BEHAVIOUR OF CONCRETE UNDER RESTRAINED SHRINKAGE

L. Leitão<sup>1</sup>, R. Faria<sup>1</sup>, L. Teixeira<sup>1</sup>, M. Azenha<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> ISISE, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães



### RESUMO

*O artigo apresenta um inovador dispositivo experimental, desenvolvido para caraterizar o comportamento viscoelástico do betão quando submetido a trações induzidas por impedimentos à livre retração de secagem. São utilizados dois provetes de betão com a mesma secção transversal, submetidos às mesmas condições de secagem: um deles é realizado em betão simples e o outro é armado com dois varões de aço. O segundo provete é instalado num pórtico de reação, sendo tracionado em modo de controlo de força ou de deslocamento. O betão de ambos os provetes e os varões de aço são devidamente instrumentados com extensómetros e termómetros, o que permite separar as diferentes componentes de deformação do betão, isolando a parcela viscoelástica que interessa caraterizar. O dispositivo permite a determinação da evolução do módulo de elasticidade do betão, e mantém-se operacional mesmo se ocorrer a fissuração deste material, particularidades de assinalável interesse prático para o desenvolvimento dos ensaios.*

### ABSTRACT

*The paper presents an innovative experimental device, developed to characterize the viscoelastic behaviour of concrete when subjected to tensile stresses induced by restraints to drying shrinkage deformation. Two specimens of concrete with the same cross section are used, being submitted to the same drying conditions: one is made in plain concrete, whilst the other is reinforced with two steel rebars. The second specimen is installed on a reaction frame, being stretched in force or displacement control modes. The concrete of both specimens and the rebars are appropriately instrumented with strain gauges and thermometers, which allows separating the different components of concrete deformation, and thus to identify the viscoelastic one that is to be characterized. The device allows as well to determine the evolution of the elastic modulus of concrete, and remains operational even upon material cracking, features of remarkable interest for the testing operations.*

## 1. INTRODUÇÃO

O betão, um dos principais materiais utilizados na construção estrutural, tem como característica singular o facto de as

respetivas deformações evoluírem consideravelmente ao longo do tempo. Esta evolução pode ser desfavorável, pois muitas vezes as deformações associadas, como por exemplo as induzidas pela retração e pela

fluência do betão, são responsáveis por tensões autoinduzidas ou por perdas de pré-esforço, que podem pôr em causa a resposta eficaz da estrutura. A característica evolutiva associada à fluência pode também revestir-se de aspetos benéficos, pois induz redistribuições de esforços na estrutura, ou simplesmente permite reduzir a intensidade das tensões de tração instaladas no betão.

Por outro lado, e tendo em conta a importância que a fissuração do betão assume na análise estrutural em geral, a crescente utilização de betões de desempenho melhorado tem vindo a incrementar a atenção dedicada à previsão do fenómeno da fendilhação nas primeiras idades, uma vez que neste tipo de betões a retração autógena e as deformações térmicas assumem grande relevância, sendo estes fenómenos responsáveis por tensões de tração autoinduzidas.

A adequada simulação do comportamento do betão, incluindo as deformações diferidas e a suscetibilidade à fendilhação deste material, constitui assim um campo de estudo importante na análise estrutural. Desta forma, os modelos numéricos associados têm de reproduzir a natureza transiente do comportamento do betão, seja em idades jovens seja a mais longo prazo, com base numa caracterização experimental robusta e credível. A variável tempo tem de facto uma grande importância na definição das deformações de retração e de fluência, bem como nas deformações térmicas associadas à libertação do calor de hidratação do cimento, e afeta também as propriedades do betão, que evoluem consideravelmente, como é o caso do módulo de elasticidade e das resistências à tração e à compressão (Vaysburd 2002; Bentur e Kovler 2003). São também de relevar as alterações volumétricas do betão devidas às deformações térmicas, responsáveis pelo aparecimento de trações significativas caso o elemento se encontre restringido. Em geral as variações dimensionais do betão devidas à retração e ao efeito térmico não podem ser desprezadas, uma vez que os elementos estruturais apresentam quase sempre algum

grau de restrição, seja internamente, devido à presença de armaduras, ao campo térmico não uniforme ou ao diferencial de humidade ao longo da secção transversal, seja externamente, pela ligação a elementos adjacentes. Por este motivo, caso as deformações associadas ao betão sejam significativas, pode ocorrer fendilhação (Favre *et al.* 2004; Azenha e Faria 2008), a que se pode associar a contribuição da retração autógena, significativa em betões com baixas relações água/cimento. É de salientar, porém, que a fluência assume especial relevância em idades jovens (Faria *et al.* 2006), o que tona a previsão e o controlo da fendilhação do betão um processo relativamente complexo, que requer uma cuidada caracterização experimental.

No presente trabalho descrever-se-á um dispositivo experimental para aplicação de tensões de tração num elemento de betão prismático, com possibilidade de imposição de uma restrição axial variável, de forma a conseguir caracterizar corretamente o fenómeno da fluência, e a separar as parcelas relativas às deformações térmicas, à retração e à deformação elástica deste material. Outro aspeto a realçar como possibilidade deste dispositivo de ensaio relaciona-se com o facto de a fluência ser caracterizada com o betão tracionado (e não, como é usual, com o material comprimido), o que se afigura como mais consistente, tendo em vista o propósito de apoiar modelações numéricas direcionadas para a adequada previsão da fendilhação.

## 2. ENSAIO DE RETRAÇÃO COM RESTRIÇÃO LONGITUDINAL ATIVA

### 2.1. Introdução

Os ensaios em elementos de betão com restrição longitudinal controlada surgiram na década de 1960, com o objetivo de avaliar as tensões devidas aos efeitos da temperatura em betão endurecido. Este tipo de ensaios utilizava provetes com uma forma peculiar, apresentando extremidades com formatos tipo ‘*dog-bone*’ ou ‘*dove-tail*’, para permitir a respetiva ancoragem numa estrutura rígida (normalmente de aço), responsável pela indução da restrição pretendida. Face às

possibilidades deste tipo de ensaios, houve posteriormente uma evolução gradual dos sistemas de forma a permitir o estudo da retração impedida em betões desde as primeiras idades. Neste âmbito convém destacar o sistema desenvolvido por Kovler (1994), que era dotado de um sistema de controlo completamente automático. Este controlo consistia numa compensação cíclica da deformação do betão, registada em dois provetes (um restringido e um livre), baseada num critério pré-estabelecido que possibilitava a imposição de diferentes níveis de restrição à livre deformação do provete. De facto, uma vez que o ensaio minimizava a intervenção humana, permitia a obtenção de resultados com um grau de precisão apreciável, o que possibilitou começar a avaliar as deformações de fluência do betão em tração.

Mais recentemente, e com uma nova perspectiva de abordagem à presente problemática, Cusson e Hoogeveen (2007) apresentaram uma metodologia de ensaio bastante inovadora. Esta consistia em ensaiar provetes armados com a retração parcialmente restringida, com a vantagem de poder utilizar os próprios varões do elemento como forma de tracionar o betão. Basicamente, quando se pretende aplicar uma tração axial no provete restringido, um atuador hidráulico é acionado e traciona inicialmente as armaduras, que por sua vez tracionam o betão envolvente.

Face aos objetivos traçados no âmbito do presente artigo, decidiu-se optar por desenvolver um novo ensaio de restrição longitudinal realizado em betão armado, baseado no sistema experimental proposto por Cusson e Hoogeveen (2007). Esta escolha teve como principal motivação o facto de ser possível continuar o ensaio mesmo após ocorrer a fissuração do betão (devido à utilização de provetes armados), bem como tratar-se de um sistema com um custo de desenvolvimento relativamente baixo. Neste capítulo far-se-á uma descrição detalhada do desenvolvimento deste ensaio, desde a conceção do sistema até à forma de obtenção de resultados. Proceder-se-á a uma breve descrição do

pórtico desenvolvido e dos conceitos teóricos associados, de forma a explicar como é possível separar as contribuições das diferentes deformações envolvidas num betão submetido a retração, fluência e a uma restrição axial de tração.

## 2.2. Descrição geral do sistema de restrição adotado

O ensaio de retração com restrição ativa adotado desenvolve-se através da instrumentação simultânea de dois provetes: um de betão com varões embebidos, ensaiado num pórtico que confere restrição variável à deformação ('Variable Restraining Frame' – VRF), bem como um provete de betão simples que não se encontra restringido (proвете livre ou 'dummy') – ver Figs 1 e 2. Em ambos os provetes registam-se as deformações e as temperaturas, utilizando para o efeito extensómetros eléctricos, extensómetros de embeber de cordas vibrantes e sensores de temperatura (ver Fig. 3). No provete armado é possível, através do VRF, controlar as deformações/tensões aplicadas através da utilização de cilindros hidráulicos, que permitem o ajuste das forças envolvidas. Este controlo requer o conhecimento detalhado das deformações térmicas e de retração do betão, sendo esta informação fornecida pelo provete livre.

No VRF a força aplicada pelos cilindros hidráulicos é registada recorrendo à utilização de células de carga. Desta forma é possível separar as deformações térmicas e de retração que ocorrem no VRF e no provete livre (tendencialmente iguais em ambos os provetes), das deformações elásticas e de fluência que ocorrem exclusivamente no VRF. Numa fase posterior, através da informação

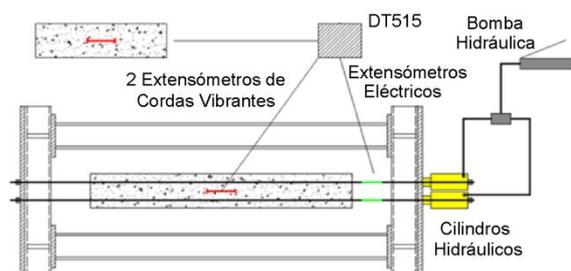


Fig. 1 – Dispositivo de ensaio VRF, com os provetes armado e 'dummy'.

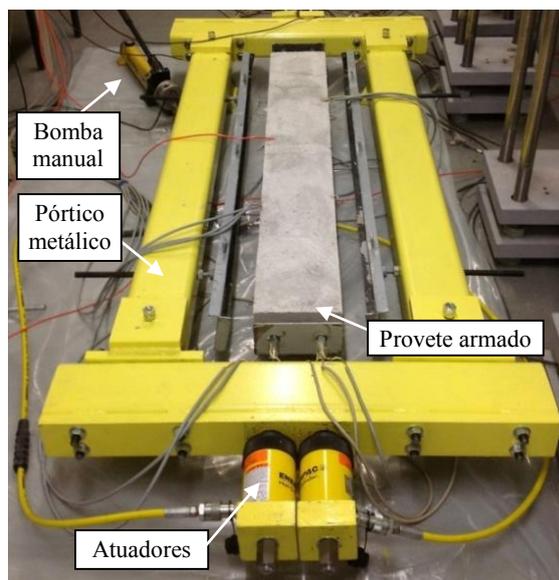


Fig. 2 – Vista geral do sistema de restrição adotado (VRF) após a betonagem do molde metálico.

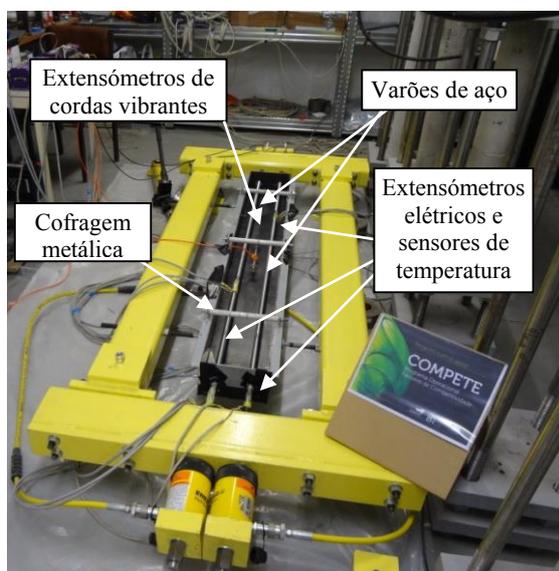


Fig. 3 – Vista geral do VRF antes da betonagem do molde metálico.

das células de carga e do conhecimento do valor do módulo de elasticidade do betão (que apesar do seu carácter evolutivo pode ser determinado no próprio VRF, através de ciclos de descarga/recarga realizados em instantes pré-determinados), é possível estimar as tensões instaladas no betão e a correspondente deformação elástica e de fluência. Ao longo do ensaio é efetuado o cálculo das diversas extensões, sendo assim possível desenvolver testes em controlo de força (através da análise da tensão no betão) ou em controlo de deslocamento (através da análise da deformação total do provete do

VRF). O objetivo do presente ensaio é conseguir caracterizar adequadamente o comportamento do betão sob estados de tração induzidos pela retração. Nesse sentido, é importante conseguir identificar e separar as contribuições dos diferentes tipos de solicitações que ocorrem no betão ao longo do ensaio, nomeadamente as decorrentes das deformações térmicas, das deformações por retração e da força axial imposta ao provete do VRF pelos atuadores hidráulicos.

### 2.3. Formulação para obtenção das deformações e tensões no provete do VRF

Nas secções que se seguem apresentar-se-á a formulação que permite descrever as deformações e tensões que se desenvolvem no provete do VRF devidas a cada uma das solicitações ocorrendo isoladamente, aplicando depois o princípio da sobreposição dos efeitos por forma a obter as correlações finais entre as leituras do ensaio e os resultados pretendidos. A apresentação envolverá apenas metade da geometria dos provetes, atendendo às simetrias existentes. De forma a evitar ambiguidades adotou-se a seguinte convenção: considerar-se-ão com sinal positivo as expansões e os esforços/tensões de tração.

#### 2.3.1. Efeito da deformação de retração do betão

A Fig. 4 esquematiza os provetes restringido (armado) e livre sob a ação isolada da retração. Nas Figs 4a-b representa-se a extensão de retração livre  $\epsilon_{cD,sh}$  no provete ‘dummy’, que é medida diretamente através de um sensor de cordas vibrantes embebido no betão. As Figs 4c-d-e reproduzem o comportamento do provete restringido, em que a extensão mecânica no betão é designada por  $\epsilon_{c,sh}$  e a dos varões por  $\epsilon_{s,sh}$ . A extensão  $\epsilon_{c,sh}$  pode ainda ser decomposta nas suas componentes elástica,  $\epsilon_{ce,sh}$ , e de fluência,  $\epsilon_{cc,sh}$ :

$$\epsilon_{c,sh} = \epsilon_{ce,sh} + \epsilon_{cc,sh} \quad (1)$$

Com base na compatibilidade das deformações no aço e no betão do provete armado pode ainda estabelecer-se que:

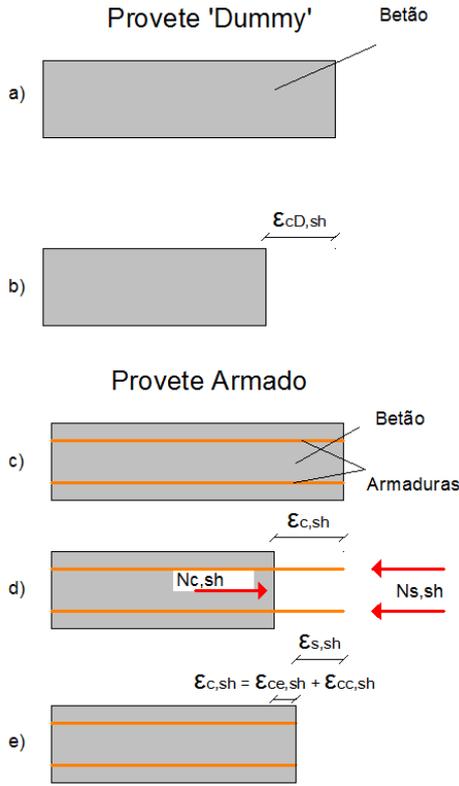


Fig. 4 – Comportamento sob a ação exclusiva da retração.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cD,sh} &= \varepsilon_{s,sh} - \varepsilon_{c,sh} = \\ &= \varepsilon_{s,sh} - \varepsilon_{ce,sh} - \varepsilon_{cc,sh} \end{aligned} \quad (2)$$

Estabelecendo o equilíbrio de forças no provete armado, sob a atuação isolada da retração, o esforço axial no betão,  $N_{c,sh}$ , é simétrico do instalado nos varões de aço,  $N_{s,sh}$ :

$$N_{c,sh} = -N_{s,sh} \quad (3)$$

Definindo  $\rho = A_s/A_c$ , em que  $A_s$  assinala a secção transversal de armaduras e  $A_c$  a secção transversal do betão, é possível escrever a Eq. 3 na forma:

$$\sigma_{c,sh} = -\sigma_{s,sh} \rho \quad (4)$$

em que  $\sigma_{c,sh}$  representa a tensão normal no betão e  $\sigma_{s,sh}$  a tensão axial no aço.

Sendo  $E_s$  o módulo de elasticidade do aço e  $E_c(t)$  o módulo de elasticidade do betão (variável no tempo  $t$ ), aplicando a lei de Hooke à Eq. 4 é possível obter a deformação elástica que se desenvolve no betão devido ao efeito da retração:

$$\varepsilon_{ce,sh} = -\varepsilon_{s,sh} \frac{E_s}{E_c(t)} \rho \quad (5)$$

Aplicando este resultado na Eq. 2, a deformação de fluência no betão devido à atuação da retração é então:

$$\varepsilon_{cc,sh} = \varepsilon_{s,sh} \left( 1 + \frac{E_s}{E_c(t)} \rho \right) - \varepsilon_{cD,sh} \quad (6)$$

### 2.3.2. Efeito do esforço axial induzido pelos cilindros hidráulicos

Designando por  $N(t)$  o esforço axial instalado pelos atuadores hidráulicos no provete armado, a equação de equilíbrio do sistema determina que:

$$N(t) = N_c(t) + N_s(t) \quad (7)$$

sendo  $N_c(t)$  e  $N_s(t)$  os esforços axiais no betão e no aço, respetivamente. Nas Figs 5a-b é possível observar o comportamento do provete sob a atuação da carga axial  $N(t)$ .

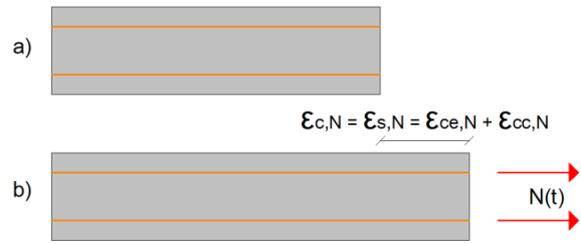


Fig. 5 – Extensão no provete restringido devido ao esforço axial  $N(t)$ .

A compatibilidade das deformações impõe a igualdade das deformações no betão,  $\varepsilon_{c,N}$ , e no aço,  $\varepsilon_{s,N}$ , associadas ao esforço axial  $N(t)$ . Decompondo a extensão no betão,  $\varepsilon_{c,N}$ , na sua componente elástica,  $\varepsilon_{ce,N}$ , e na sua componente de fluência,  $\varepsilon_{cc,N}$ , obtém-se:

$$\varepsilon_{s,N} = \varepsilon_{c,N} = \varepsilon_{ce,N} + \varepsilon_{cc,N} \quad (8)$$

Substituindo a Eq. 8 na Eq. 7, invocando a lei de Hooke obtém-se:

$$\begin{aligned} N(t) &= E_c(t) A_c \varepsilon_{ce,N} + E_s A_s \varepsilon_{s,N} = \\ &= E_c(t) A_c (\varepsilon_{s,N} - \varepsilon_{cc,N}) + E_s A_s \varepsilon_{s,N} \end{aligned} \quad (9)$$

De forma análoga à Eq. 6, é possível determinar a extensão de fluência no betão,  $\varepsilon_{cc,N}$ , devida ao esforço axial  $N(t)$ :

$$\varepsilon_{cc,N} = \varepsilon_{s,N} \left( 1 + \frac{E_s}{E_c(t)} \rho \right) - \frac{N(t)}{E_c(t) A_c} \quad (10)$$

### 2.3.3. Expressões finais aplicáveis ao provete restringido do VRF

As deduções relativas às deformações com origem numa variação térmica  $\Delta T$  seguem um procedimento idêntico ao apresentado na secção 2.3.1, pelo que se considera dispensável apresentar o correspondente detalhe. Aplicando o princípio da sobreposição dos efeitos, é possível expressar a deformação total de fluência do betão,  $\varepsilon_{cc}(t)$ , resultante das contribuições da retração,  $\varepsilon_{cc,sh}$ , da ação dos atuadores hidráulicos,  $\varepsilon_{cc,N(t)}$  e da ação térmica,  $\varepsilon_{cc,\Delta T}$ , no seguinte formato:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cc}(t) &= \varepsilon_{cc,sh}(t) + \varepsilon_{cc,N(t)}(t) + \\ &+ \varepsilon_{cc,\Delta T}(t) = \\ &= \varepsilon_{s,sh} \left( 1 + \frac{E_s}{E_c(t)} \rho \right) - \varepsilon_{cD,sh} + \\ &+ \varepsilon_{s,N} \left( 1 + \frac{E_s}{E_c(t)} \rho \right) - \frac{N(t)}{E_c(t) A_c} + \\ &+ \varepsilon_{s,\Delta T} \left( 1 + \frac{E_s}{E_c(t)} \rho \right) - \\ &-(\alpha_c - \alpha_s) \Delta T \end{aligned} \quad (11)$$

em que  $\alpha_c$  e  $\alpha_s$  designam os coeficientes de dilatação térmica do betão e do aço. Nas Eqs 12 e 13 indicam-se as relações entre as extensões que constam da Eq. 11 e as medidas no ensaio, recorrendo para estas últimas a sensores de cordas vibrantes embebidos no provete ‘dummy’, bem como a extensómetros elétricos colados nos varões do provete restringido:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cR,read} &= \varepsilon_{sR,read} = \\ &= \varepsilon_{s,sh} + \varepsilon_{s,N} + \varepsilon_{s,\Delta T} + \\ &+ \alpha_s \Delta T \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cD,read} &= \varepsilon_{cD,sh} + \varepsilon_{cD,\Delta T} = \\ &= \varepsilon_{cD,sh} + \alpha_c \Delta T \end{aligned} \quad (13)$$

em que o índice ‘R’ indica uma medição no provete restringido e o índice ‘read’ indica uma leitura obtida diretamente dos sensores.

Assim, aplicando as Eq. 12 e 13 na Eq. 11 é possível obter a equação:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cc}(t) &= (\varepsilon_{cR,read} - \alpha_s \Delta T) \times \\ &\times \left( 1 + \frac{E_s}{E_c(t)} \rho \right) - \varepsilon_{cD,read} + \\ &+ \alpha_s \Delta T - \frac{N(t)}{E_c(t) A_c} \end{aligned} \quad (14)$$

Nesta Eq. 14 é importante realçar que sendo  $\varepsilon_{cR,read}$  e  $\varepsilon_{cD,read}$  leituras diretas dos sensores no provete restringido e no provete ‘dummy’, e sendo  $\alpha_s$ ,  $\rho$  e  $E_s$  entidades conhecidas desde o início do ensaio, apenas o módulo de elasticidade do betão,  $E_c(t)$ , necessita de ser obtido ao longo do ensaio (o que é assegurado efetuando descargas e recargas quase instantâneas do provete armado, conforme anteriormente referido).

O dispositivo VRF permite também determinar facilmente a tensão imposta no betão,  $\sigma_c(t)$ , que se desenvolve ao longo do ensaio, e a extensão total no betão,  $\varepsilon_c(t)$ :

$$\sigma_c(t) = \varepsilon_{ce}(t) E_c \quad (15)$$

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{cR,read} \quad (16)$$

sendo que  $\varepsilon_{ce}(t)$  representa a extensão elástica no betão, a qual pode ser calculada como segue:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ce}(t) &= \varepsilon_c(t) - \varepsilon_{cc}(t) - \alpha_c \Delta T - \\ &- \varepsilon_{cD,sh} \end{aligned} \quad (17)$$

Assim, a Eq. 15 pode ser transformada em:

$$\begin{aligned} \sigma_c(t) &= -(\varepsilon_{cR,read} - \alpha_s \Delta T) E_s \rho + \\ &+ \frac{N(t)}{A_c} \end{aligned} \quad (18)$$

utilizando para o efeito as Eqs 14, 16 e 17.

Repare-se que caso o betão fissure a Eq. 17 fornece a medição da tensão de tração do betão na idade da fendilhação. Ainda assim, conforme referido anteriormente, o ensaio pode continuar mesmo ocorrendo fendilhação acidental, sendo esta uma vantagem muito relevante do sistema de ensaio baseado no VRF.

## 2.4. Conceção e dimensionamento do sistema de ensaio

### 2.4.1. Aplicação da força axial

Para o sistema de aplicação da força axial  $N(t)$  foram equacionadas várias possibilidades, como por exemplo a utilização de um motor mecânico de passo (recorrendo a desmultiplicadores de força), ou a utilização de um servo-atuador acoplado a uma central de pressão hidráulica. Devido a critérios de custo-benefício, optou-se pela

utilização de dois cilindros hidráulicos alimentados através de uma bomba manual (Figs. 1 e 2). Estes cilindros, de simples efeito, funcionam em gamas de altas pressões, tendo cada um a capacidade de 215 kN e dispondo de um êmbolo com um curso de 49 mm. Possuem a particularidade de serem ocos na zona central do êmbolo, com um vazamento circular de diâmetro 26.9 mm. Esta furação permite que os varões de aço do provete VRF atravessem os cilindros, sendo ancorados nas extremidades dos êmbolos.

À saída da bomba manual de alimentação hidráulica dos cilindros atuadores existe uma válvula antirretorno, para minimização das perdas de pressão no sistema. Adiante desta bomba existe um manómetro, que permite a visualização da pressão do sistema em cada instante. Numa secção posterior está instalado um transdutor de pressão, para registo da pressão do sistema em cada instante, utilizando para o efeito um sistema de aquisição DataTaker 515 – ver Fig. 1. Na ligação da mangueira proveniente da bomba manual à que alimenta os cilindros existe um ‘T’ de derivação, onde estão instaladas duas válvulas reguladoras de caudal, responsáveis pela alimentação de cada um dos cilindros. Na extremidade das mangueiras que alimentam os atuadores existem ligadores de alto fluxo, que permitem o encaixe rápido entre a mangueira e o cilindro, e impedem que ocorram perdas de óleo durante a operação.

#### 2.4.2. Pórtico metálico

No dimensionamento do pórtico metálico de reação para aplicação das forças  $N(t)$  que solicitam o provete armado, além de critérios de resistência foram tidos em conta critérios de deformabilidade do sistema, tendo estes últimos sido os mais condicionantes. A força máxima a que o sistema poderá estar sujeito é a carga máxima do par de cilindros hidráulicos, ou seja, 430 kN. Por questões relacionadas com a realização de diferentes furações e soldaduras, optou-se por conceber o pórtico com recurso a perfis tubulares da família RHS. O aço usado é da classe S275,

tendo-se imposto que para a força máxima no sistema a tensão normal nos perfis RHS não deveria ultrapassar 15% da tensão de cedência do aço. Este critério permitiu que as deformações no pórtico fossem baixas, e que nos perfis sujeitos a compressões se evitassem fenómenos de instabilidade.

Concebeu-se ainda um sistema de cofragem incorporado no pórtico metálico, para facilitar a betonagem do provete diretamente no sistema de ensaio VRF, e também para evitar a necessidade de reposicionamento do provete, minimizando-se assim perturbações no sistema de ensaio. A cofragem é constituída por chapas metálicas com 4mm de espessura, podendo ser removida com o auxílio de um mecanismo de porca-parafuso. A extremidade do parafuso é de cabeça esférica, o que permite o recuo da cofragem.

O pórtico metálico dispõe ainda de apoios verticais ajustáveis, que permitem regular a distância do VRF ao pavimento, a fim de possibilitar uma secagem uniforme de todas as faces do provete armado após a descofragem.

#### 2.4.3. Secção transversal dos provetes do VRF e livre

As secções transversais de betão dos provetes VRF e livre são iguais, tendo sido escolhida uma geometria capaz de garantir que toda a área de betão do provete armado funcionasse como efetiva (de acordo com o Eurocódigo 2 2010), isto é, mobilizável pelos varões longitudinais através da aderência aço-betão. Foi ainda definida de forma a garantir que a secção dos varões satisfizesse a percentagem de armadura mínima de um tirante de betão armado, esta última calculada com base no critério de plastificação da armadura (Eurocódigo 2 2010). Optou-se assim por uma secção retangular de  $0,20 \times 0,10 \text{ m}^2$ , em que a maior dimensão é a horizontal, estando os varões de aço a meia altura e segundo esta direção (ver Fig. 6) A dimensão longitudinal dos provetes foi determinada com base no comprimento de aderência dos varões de aço, e assegurando que se teria pelo menos 1,0 m de

comprimento do provete em que se formasse um campo uniforme de extensões de tração. Assim a dimensão longitudinal do provete é de 1,5 m.



Fig. 6 – Secção transversal do provete armado.

#### 2.4.4. Instrumentação

No cento geométrico do provete livre de betão é colocado um sensor de cordas vibrantes embebido (direção longitudinal), a fim de registar as deformações de retração do betão, bem como eventuais deformações devidas a variações térmicas.

O provete com os varões de aço é instrumentado em três secções distintas (Fig. 3). A meio do desenvolvimento longitudinal o provete VRF é instrumentado com um extensómetro de cordas vibrantes embebido no betão, que permite também a medição de temperatura. Sensivelmente a um terço e a dois terços do comprimento do provete os varões de aço estão instrumentados, em cada secção (ver Fig. 3), com dois extensómetros elétricos (dispostos em faces diametralmente opostas) e um sensor de temperatura resistivo PT100.

A instrumentação de várias secções tem o objetivo de comparar os valores obtidos em todas elas, por forma a verificar se o campo de extensões no provete é uniforme. Uma vantagem adicional desta redundância da instrumentação é a de permitir que o ensaio possa prosseguir mesmo que ocorra a fendilhação do betão numa das secções instrumentadas, o que danificará os sensores aí posicionados. É de facto relevante a probabilidade de a fendilhação ocorrer numa secção instrumentada, por esta se apresentar ligeiramente fragilizada devido à instalação de cabos elétricos, e ainda pelo facto de não ser totalmente desprezável a dimensão e intrusão dos

sensores. Nesta eventualidade, a redundância de sensores permite substituir o comando do ensaio baseado nos sensores de uma secção que venha a fissurar pelos sensores de outra secção que não tenha sido afetada por aquela fenda. Também como redundância o sistema possui duas células de carga, para medição das forças instaladas por cada cilindro hidráulico.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Introdução

No presente capítulo demonstram-se as potencialidades do dispositivo experimental VRF, e apresentam-se os resultados mais relevantes obtidos com um ensaio conduzido em controlo de força. Neste género de ensaios o objetivo é manter a tensão constante no betão, para o que é necessário alterar gradualmente a força instalada nos varões, pois devido ao efeito da fluência a força imposta pelos atuadores hidráulicos passa gradualmente do betão para o aço. Reafirma-se a possibilidade de o sistema permitir também a realização de ensaios em controlo de deslocamento, usualmente conduzidos através da imposição de uma condição de anulamento da deformação total do betão, retirando partindo da informação fornecida pela Eq. 16. É importante referir ainda que o sistema baseado no VRF fornece medições de extensões com erros inferiores a  $0,1\mu\epsilon$ , destacando-se assim de sistemas congéneres pela elevada precisão e estabilidade dos resultados que permite obter.

#### 3.2. Protocolo de ensaio

No primeiro ensaio realizado utilizou-se um betão auto-compactável com características de resistência da classe C40/50 e com uma relação w/c de 0.5. Como armadura longitudinal foram utilizados dois varões roscados, com 20 mm de diâmetro e um aço da classe 8.8, os quais foram centrados na secção transversal de betão, assegurando-se um recobrimento de 35 mm.

O ensaio realizou-se no interior de uma câmara climática com uma temperatura de 20 °C e uma humidade relativa de 50%, para que a experiência não fosse afetada por variações

da temperatura e humidade ambientais. Optou-se por começar o ensaio 48h após a betonagem, a fim de minimizar o efeito da variação de temperatura decorrente da libertação do calor de hidratação do cimento, sendo que numa primeira fase os provetes foram selados e deixados em repouso durante 24h. Após este período os provetes foram descofrados. Ao fim de 64h, instante em que as temperaturas estabilizaram tanto no provete armado como no provete livre, iniciou-se o ensaio aplicando a tensão de tração pretendida no provete do VRF.

Neste ensaio preliminar o critério definido foi tentar manter a tensão de tração no betão num valor constante em torno de  $\sim 1.60$  MPa, correspondente a 50% da resistência à tração estimada para o material na idade de início de aplicação da carga. Assim, de uma forma iterativa foi possível ajustar a carga  $N(t)$  no sistema, garantindo a tensão objetivo pré-definida. No entanto, é importante realçar que pelo facto de se tratar de um ensaio preliminar, e se pretender apenas avaliar as capacidades do VRF, optou-se por não impor um controlo demasiado restritivo da variação da tensão de tração imposta ao betão, permitindo-se que esta oscilasse entre 1.50 MPa e 1.70 MPa ( $\pm 0.20$  MPa). Na realidade, o sistema de ensaio baseado no VRF possibilita um controlo mais refinado desta ‘tensão de tração alvo’, podendo facilmente assegurar-se uma precisão de  $\pm 0.05$  MPa.

### 3.3. Resultados experimentais

Nesta secção apresentam-se os resultados experimentais associados a um ensaio de caracterização completo desenvolvido pelo dispositivo experimental VRF, com dois objetivos distintos: (i) identificar quais os resultados associados ao ensaio de restrição à retração do betão que é possível avaliar; (ii) demonstrar a qualidade e precisão da técnica de ensaio, aspetos fundamentais que não têm sido devidamente reportados na bibliografia relativamente a sistemas congéneres.

Na Fig. 7 é possível verificar que devido ao facto de o ensaio decorrer no interior de

uma câmara climática as temperaturas no interior dos provetes mantêm-se praticamente constantes, ocorrendo variações na ordem de  $0,2$  °C. Uma vez que a variação de temperatura é mínima, a Fig. 8, correspondente a medições de extensões efetuadas no betão do provete livre, confirma o que era expectável: a curva de cor castanha, que reproduz a deformação livre de retração do betão, é praticamente idêntica à curva azul registada diretamente no provete ‘dummy’, a qual engloba adicionalmente as deformações térmicas.

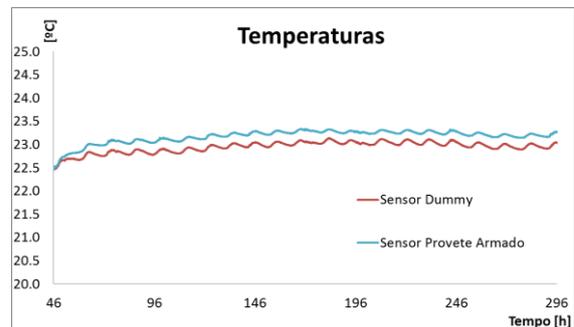


Fig. 7 – Temperaturas registadas nas secções instrumentadas do provete armado.

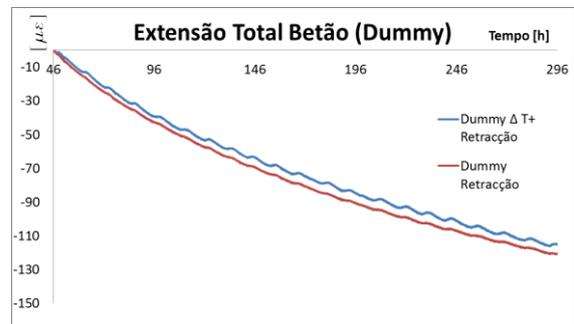


Fig. 8 – Deformação e retração livre no provete ‘dummy’.

Na Fig. 9 constata-se que foi respeitado o critério de imposição de uma tensão de tração aproximadamente constante no betão do presente ensaio, situando-se a referida tensão dentro dos limites ‘alvo’ pré-estabelecidos. Na Fig. 10 apresentam-se os resultados associados à medição do sensor de cordas vibrantes inserido no provete armado, que permite obter diretamente a extensão total no betão. É possível observar na Fig. 9 e na Fig. 10 que se efetuaram ciclos de descarga/recarga da tensão de tração imposta ao betão do provete armado, de forma a poder

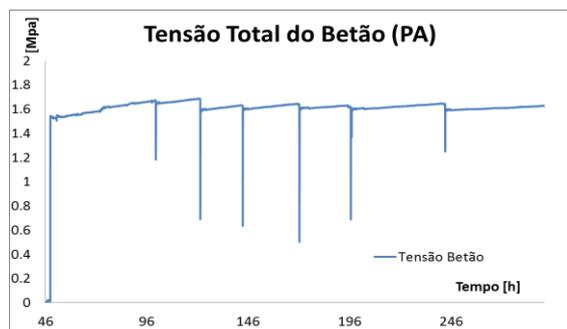


Fig. 9 – Tensão total no provete armado.

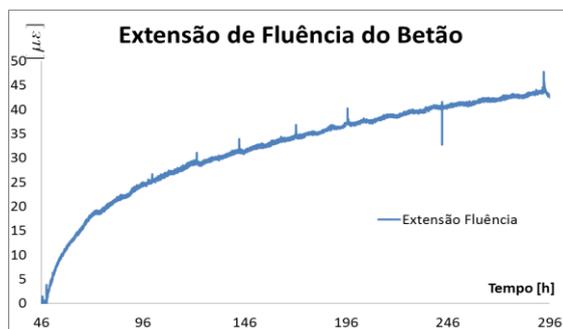


Fig. 11 – Extensão de fluência no betão.

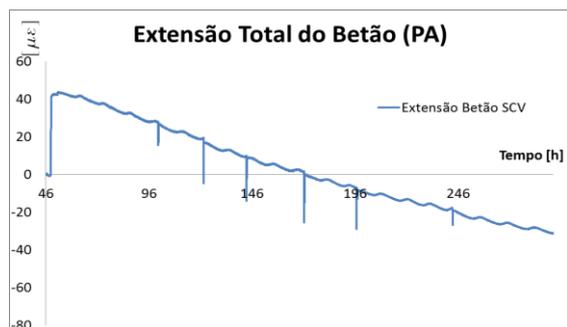


Fig. 10 – Extensão total no provete armado medida pelo sensor de cordas vibrantes (SCV).

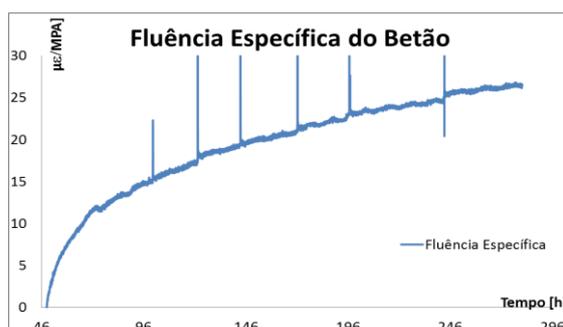


Fig. 12 – Fluência específica no betão.

determinar o módulo de elasticidade do betão (identificáveis pelas linhas verticais às 100h, 122h, 143h, 171h, 196h e 243h horas). Esta é uma potencialidade interessante do sistema, uma vez que permite a caracterização da evolução do  $E_c$  ao longo da maturação do betão, e em condições de tração.

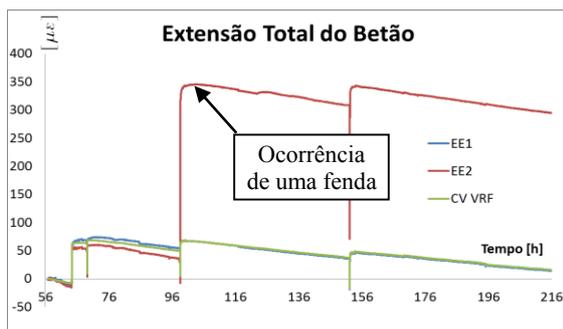
Na Fig. 11 é possível observar a evolução da extensão de fluência no betão, e na Fig. 12 a correspondente fluência específica (relação entre a extensão de fluência e a tensão de tração instalada no betão), obtidas com esta metodologia de ensaio e utilizando as expressões apresentadas na secção 2.3. Tendo em conta a precisão do sinal de leitura associado, considera-se que é possível estimar com rigor as deformações associadas à fluência do betão em tração. As perturbações localizadas que podem ser observadas nas curvas representadas estão associadas ao facto de o limite aceite para a variação de tensão de tração ter tido uma gama entre 1.50 e 1.70 MPa (como referido anteriormente), algo que não deve ser considerado como uma limitação, pois pode ser reduzido na medida em que a exigência de precisão do ensaio o justifique.

### 3.4. Ensaio com fendilhação induzida no betão

Nesta secção apresentam-se resultados experimentais associados a um ensaio em que se induziu a fendilhação do provete armado, com dois objetivos distintos: (i) identificar a capacidade de se poder continuar o ensaio após ocorrer a fendilhação do provete armado; e (ii) demonstrar que é possível conduzir o ensaio recorrendo apenas à utilização de extensómetros elétricos colados nos varões para medir as deformações no provete armado, dispensando-se assim o recurso a sensores de cordas vibrantes embebidos no betão deste provete.

Na Fig. 13 é possível verificar que as extensões medidas no provete armado em três secções diferentes apresentam boa concordância numa fase inicial. Desta forma é possível concluir que as três secções apresentam uma distribuição uniforme de tensões, pois as extensões medidas nos varões (EE1 e EE2) são idênticas às registadas na secção de betão (CV VRF). Assim, confirma-se a possibilidade de conduzir este tipo de ensaios recorrendo simplesmente a extensómetros elétricos colados nos varões do provete armado. Na

Fig. 13 é também possível observar, cerca das 98h, uma significativa descontinuidade na medição registada pelos extensómetros elétricos do varão 2 (EE2), devida à formação de uma fenda na secção de betão onde estes extensómetros estão localizados. No entanto, verifica-se que as restantes secções instrumentadas não assinalam qualquer anomalia ou perturbação, uma vez que se encontram suficientemente afastadas da fenda, o que permitiu prosseguir o ensaio com recurso à informação dessas secções. Esta possibilidade de continuar o ensaio após a fissuração do betão – inviável nos ensaios clássicos utilizando provetes de betão simples – é uma das potencialidades inovadoras do sistema VRF, revelando-se fundamental perante a ocorrência de imprevistos, e este aumento da robustez do ensaio é uma característica crucial.



**Fig. 13** – Extensão total no provete armado medida pelos extensómetros elétricos (EE) e pelo sensor de cordas vibrantes (CV VRF).

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um dispositivo de ensaio concebido para a caracterização do comportamento do betão sob restrição à deformação imposta pela retração, tendo em linha de conta o comportamento diferido e a fissuração do betão. O sistema inclui a monitorização do comportamento do betão em dois provetes geometricamente similares: (i) um em betão simples (para monitorização das deformações devidas à retração e à temperatura) e (ii) o outro em betão armado com dois varões roscados (para indução da restrição pretendida). Criou-se um sistema versátil com base na informação reportada na bibliografia, mas

incluindo um conjunto de novas capacidades de ensaio, no contexto de um projeto de investigação recentemente concluído. O sistema permite realizar o ensaio em controlo de força ou de deslocamento, podendo ser iniciado nas primeiras idades do betão, logo após o instante de aderência com as armaduras, ou numa idade mais avançada.

A precisão das medições obtidas e a repetibilidade de ensaios efetuados permitiu realizar no âmbito do projeto uma vasta campanha experimental, para caracterização sistemática de vários tipos de betões. Uma das principais vantagens do sistema de ensaio descrito, em comparação com a grande maioria de sistemas congéneres reportados na bibliografia, é o facto de o ensaio poder continuar mesmo após a fissuração do betão. Esta situação foi testada em ensaios de controlo de força e de deslocamento, sendo os resultados obtidos coerentes com os expectáveis.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto de investigação PTDC/ECM/099250/2008. Agradece-se ainda à FCT o financiamento das unidades de investigação LABEST e ISISE e da bolsa do primeiro autor SFRH/BD/76183/2011.

#### 6. REFERÊNCIAS

- A. Bentur e K. Kovler, Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems. *Materials and Structures*, Vol. 36, 183-190, 2003.
- Azenha, M. e R. Faria, Temperatures and stresses due to cement hydration on the R/C foundation of a wind tower - A case study. *Engineering Structures*, 2008 30(9): pp. 2392-2400.
- Cusson, D. e Hoogeveen, T. J. An experimental approach for the analysis of early-age behaviour of high-performance concrete structures under restrained shrinkage *Cement and Concrete Research*, 37, 2, 200-209, 2007.

Eurocódigo 2 Projeto de Estruturas de Betão Parte 1-1 Regras Gerais e Regras para Edifícios NP EN 1992-1-1, 2010. Faria, R., M. Azenha, and J.A. Figueiras, Modelling of concrete at early ages: Application to an externally restrained slab. *Cement and Concrete Composites*, 2006. 28(6): p. 572-585.

Favre, R., et al., Dimensionnement des structures en béton: Aptitude au service, éléments de structures. 2004. *Traité de Génie Civil de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne*: Lausanne.

Kovler, K., Testing system for determining the mechanical behavior of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage. *Mater. Struct.* 27 (170), 324- 330, 1994.

Vaysburd, A. M, Emmons, P. H., Bissounette, B. e Pigeon, M., Some aspects of evaluating cracking sensitivity of repair materials. RILEM Proceedings PRO 23, Early Age Cracking in Cementitious Systems - EAC'01. Proc. Intern. RILEM Conf., Haifa, Israel, March 12-14, 2001, Ed. K. Kovler and A. Bentur, RILEM Publications S.A.R.L., 169-185, 2002.