

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO CÍCLICO DE VIGAS DE BETÃO ARMADO FENDILHADAS, COM SENSORES DE BRAGG

CHARACTERIZATION OF THE CYCLIC BEHAVIOR OF CRACKED REINFORCED CONCRETE BEAMS USING BRAGG SENSORS

C. Sousa¹, C. Rodrigues², J. Malveiro¹, R. Calçada¹, A. Serra Neves¹

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Porto

² Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia do Porto



RESUMO

Nas estruturas em betão armado, o conhecimento da distribuição de tensões ao longo dos varões de aço, sob efeito de carregamentos cíclicos, desempenha um papel fundamental para a calibração e desenvolvimento de modelos numéricos que traduzam o comportamento cíclico de estruturas fendilhadas. O presente trabalho apresenta um procedimento para caracterização laboratorial das extensões em vigas de betão armado recorrendo a arrays de sensores de Bragg em fibra ótica. Cada array contém 10 sensores de deformação, afastados de 25mm, permitindo caracterizar a evolução das deformações ao longo do desenvolvimento dos varões. É assim possível avaliar a influência da aderência entre as armaduras e o betão, e a conseqüente variação de tensões no aço para diferentes distâncias relativamente à secção de uma fenda transversal. Os resultados experimentais são comparados com previsões numéricas considerando modelos constitutivos para o comportamento cíclico da aderência aço-betão e para a resposta cíclica na secção da fenda.

ABSTRACT

The characterization of the longitudinal stress distribution along the reinforcing bars, in reinforced concrete structures, plays an important role for the development and calibration of numerical models to describe the cyclic behavior of cracked structures. The present work presents a procedure for laboratorial evaluation of strains in RC beams using arrays of optical fiber Bragg grating sensors. Each array is composed of 10 strain sensors spaced 25 mm apart, which measure the strain variation along the bar length. In this way, bond-slip effects, and the resulting variation of steel stresses with the distance to the crack section, can be determined. The experimental results are compared with numerical calculations considering constitutive models to describe the cyclic bond stress-slip relationship at the interface between the steel bar and the surrounding concrete, and the normal stress-crack opening relationship under cyclic loading.

1. INTRODUÇÃO

O cálculo, rigoroso, da resposta estrutural de elementos de betão armado (BA) ou pré-esforçado, fendilhados, sujeitos a ações cíclicas, desempenha um papel importante em diversas aplicações, nomeadamente (Sousa et al. 2014):

- determinação de aberturas residuais de fendas e de deformações residuais em pontes em BA ou pré-esforçado, considerando os efeitos das ações variáveis (Laurentet 1999; Rotilio 1998);

- avaliação do comportamento dinâmico de pontes em linhas de alta velocidade, considerando os efeitos da fendilhação (Delgado et al. 2008);
- avaliação das consequências de cargas elevadas previamente aplicadas, e da influência que estas podem ter sobre o comportamento de estruturas fendilhadas (Neild et al. 2002);
- interpretação dos resultados da monitorização do comportamento de estruturas fendilhadas (Maeck et al. 2000).

Nas aplicações referidas importa avaliar a resposta cíclica de estruturas para níveis de sollicitação compatíveis com a fase de serviço. Ora, nesses casos, é fundamental dispor de modelos constitutivos que caracterizem convenientemente os efeitos de aderência entre as armaduras tracionadas e o betão envolvente nas proximidades das fendas, sendo esse o mecanismo fundamental que governa a resposta não-linear. Os ensaios correntes para caracterização da aderência aço-betão, os ensaios do tipo *pull-out* e *beam test* (CEN 2005; Gamski 1973), não permitem uma avaliação da distribuição das tensões de aderência na proximidade das fendas, em condições realistas de confinamento, e com distribuições realistas de tensões, quer no aço, quer no betão.

Assim, foram desenvolvidas técnicas para avaliar a variação de extensões ao longo de um varão de armadura e, deste modo, determinar indiretamente a distribuição de tensões de aderência em estruturas (estruturas reais ou provetes para ensaios laboratoriais). Mains (1951) foi pioneiro na utilização de uma técnica que consiste em instalar *arrays* de extensómetros elétricos de resistência no interior de armaduras em estruturas de BA. A necessidade de instalar os extensómetros no interior dos varões prende-se com os efeitos indesejáveis que a instalação desses extensómetros na superfície dos varões acarretaria em termos de aderência aço-betão. Para instalar os extensómetros no interior dos varões de aço, Mains (1951) maquinou os varões de modo a obter, inicialmente, duas barras com

secção transversal em forma de meio-círculo. Depois, foi feito um rasgo num dos meios círculos, formando um canal para instalação dos extensómetros elétricos e para passagem dos fios de ligação. Finalmente, as duas metades foram unidas, formando um varão com superfície exterior semelhante a um varão corrente. Foi assim possível medir extensões ao longo da barra de aço e, conseqüentemente, determinar a variação de tensões na armadura e a distribuição de tensões tangenciais na interface entre o varão e o betão envolvente. Esta técnica foi posteriormente empregue por autores tais como Bresler e Bertero (1968), Nilson (1972), Kankan (1997) e Scott e seus colaboradores (Judge et al. 1989, 1990; Scott 1996; Scott and Gill 1987; Scott and Beeby 2005). Este autor chegou a instalar 100 extensómetros ao longo de um varão com 12 mm de diâmetro, num canal com secção transversal de 4 mm por 4 mm.

Embora a instalação de extensómetros no interior dos varões permita evitar a degradação das características de aderência na superfície, não evita a modificação das propriedades da barra (nomeadamente a sua secção transversal, e o facto de a barra ser formada por duas metades ligadas posteriormente). Além disso, a necessidade de maquinação das barras de armadura e a posterior ligação de duas metades torna complexa a tarefa de instalação dos extensómetros. Para contornar estas desvantagens, foi recentemente desenvolvida, por Nellen et al. (2002) e Kenel et al. (2005) uma técnica alternativa para medição da distribuição de extensões ao longo de um varão, recorrendo a *arrays* de sensores de Bragg em fibra ótica. A fibra foi instalada num sulco gravado na superfície do varão, com 1 mm de espessura e 1 mm de profundidade, recorrendo a uma cola à base de epoxi. A instalação no sulco confere proteção mecânica à fibra e a modificação das propriedades da barra em consequência desse sulco são negligenciáveis, atendendo à sua reduzida dimensão. Os autores concluíram que foi possível medir extensões com valor elevado e grandes gradientes de extensão, com elevada precisão.

No presente trabalho esta técnica experimental é empregue no estudo do comportamento cíclico de vigas de betão armado fendilhadas. Caracterizando a distribuição longitudinal de extensões ao longo de varões de betão armado, pretende-se determinar a variação das tensões de aderência aço-betão, em função da distância à secção da fenda e do nível de carregamento. Duas vigas com 4,5 m de comprimento são sujeitas a um carregamento cíclico com amplitude constante. Em cada viga, dois varões de 12 mm de diâmetro são instrumentados com *arrays* de sensores de Bragg em fibra ótica. Estas medições são complementadas por outras recorrendo a transdutores de deslocamento e fissurómetros (ambos baseados em pontes completas de extensómetros elétricos de resistência).

Finalmente, as extensões medidas são confrontadas com valores calculados recorrendo a um modelo onde são considerados, explicitamente, um modelo constitutivo que descreve o comportamento cíclico em termos de relação entre a tensão de aderência aço-betão e o deslizamento, e também um modelo constitutivo que descreve o comportamento cíclico do betão tracionado, em termos de relação local entre tensão normal à fenda e abertura de fenda. Os resultados obtidos experimentalmente permitiram validar os modelos adotados, tendo-se verificado uma boa concordância entre resultados numéricos e experimentais.

2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

Foram ensaiadas em laboratório duas vigas, com um comprimento total de 4,50 m e uma altura de 0,60 m.

2.1 Geometria e armaduras

As vigas ensaiadas apresentam uma secção transversal constante em todo o comprimento, em forma de “T” invertido, com as dimensões indicadas na Fig. 1a. Com esta geometria, pretende-se simular o comportamento de um tabuleiro vigado de ponte, onde a laje é tracionada na região

sobre os apoios de continuidade. A viga foi betonada em duas fases, criando uma junta de betonagem na separação entre o banzo e a alma, simulando assim um processo construtivo representativo das estruturas reais. As armaduras longitudinais e os estribos estão representados na Fig. 1b. As armaduras transversais estão distanciadas de 15 cm, distância esta que se espera que condicione a distância entre fendas de flexão na zona mais tracionada da viga. A espessura de recobrimento das armaduras tem o valor de 25 mm. As armaduras longitudinais de tração são formadas por varões com 12 mm de diâmetro.

As vigas foram ensaiadas com um vão simplesmente apoiado de 4,00 m, conforme se representa na Fig. 2. O carregamento cíclico é aplicado recorrendo a um atuador hidráulico servo-controlado, centrado em relação ao comprimento da viga. Sobre a viga é disposto um perfil metálico que transforma a força do atuador em duas forças pontuais distanciadas de 0,80 m, por forma a materializar um diagrama de momentos flectores com valor constante na zona central da viga (Fig. 2).

O sistema composto pela viga a ensaiar, pelos seus apoios e pelo sistema de introdução das cargas cíclicas foi instalado num pórtico metálico de reacção (Fig. 2).

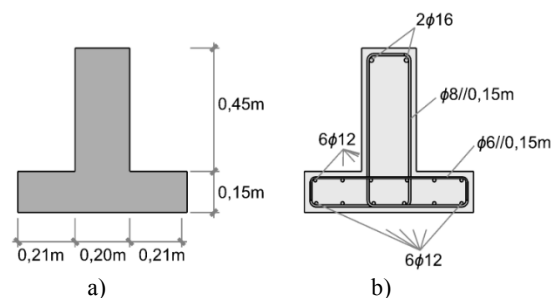


Fig. 1 – Secção transversal das vigas ensaiadas: a) geometria; b) armaduras.

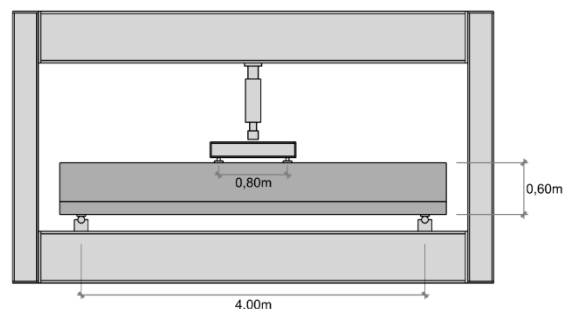


Fig. 2 – Esquema do ensaio: sistema de aplicação do carregamento, vão e sistema de suporte.

2.2 Monitorização

Foram instalados transdutores de deformação e transdutores para medição da abertura de fendas, em ambos os lados (identificados por este e oeste) de cada uma das vigas ensaiadas (Fig. 3 e Fig. 4).

Para medição de deformações médias no betão, foram instalados, pelo exterior, transdutores de deslocamento, do tipo “PI Displacement Transducer”, do fabricante “TML, Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd”, que utilizam uma ponte de Wheatstone completa de extensómetros de resistência elétrica. Estes transdutores foram instalados na zona comprimida da seção instrumentada (transdutores com base de medida de ~200 mm, designados nas figuras por *PI200mm*) e na zona tracionada (transdutores com base de medida de ~300 mm, designados nas figuras por *PI300mm*).

A abertura de fenda, na zona central da viga, foi medida por intermédio de dois transdutores (um em cada face da viga) do tipo “KG-A Crack Displacement Transducer”, do fabricante “TML, Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.”. A base de medida destes transdutores é de 100 mm, sendo adotada, nas figuras, a designação *KG100mm*. Para garantir que se formava uma fenda entre os pontos de fixação do transdutor *KG100mm*, foi previsto um entalhe na face inferior da viga, na secção de meio vão, numa posição coincidente com um estribo (Fig. 4). O entalhe estende-se a toda a largura da viga (0,62 m) e tem uma largura e uma profundidade de 15 mm.

Conforme foi referido, foram instalados sensores de deformação de Bragg em fibra ótica em dois varões longitudinais da armadura principal, em cada uma das vigas. Estes sensores foram fabricados pela empresa “FiberSensing”. Em cada varão existe um *array* com 10 sensores, afastados de 25 mm, a partir do eixo da viga, tal como é ilustrado no esquema da Fig. 5 (ver localização do entalhe, que coincide com o eixo da viga). A fibra foi instalada e conduzida ao longo de um sulco gravado na superfície do varão, com largura e profundidade iguais a 1 mm. Deste modo, a

alteração quer das propriedades da secção transversal do varão, quer das características da sua superfície, é negligenciável.

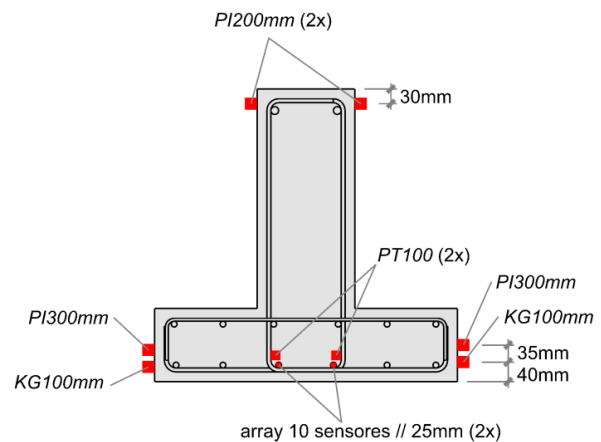


Fig. 3 – Sensores na zona de meio vão – representação em secção transversal.

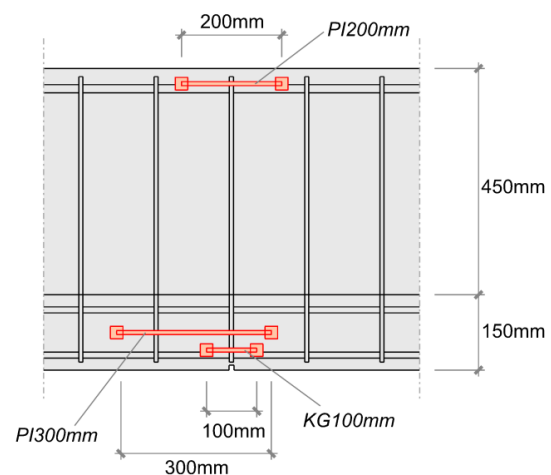


Fig. 4 – Transdutores de deformação na zona de meio vão – representação em alçado com indicação da posição das armaduras e do entalhe inferior.

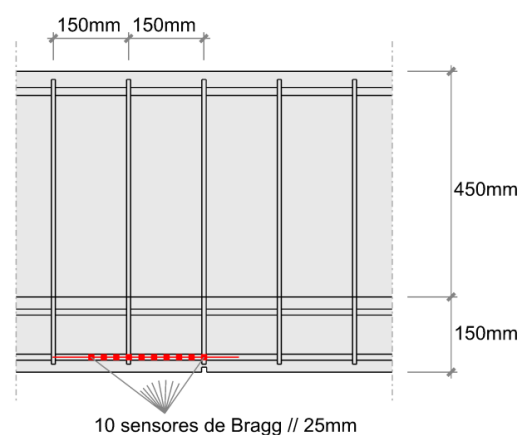


Fig. 5 – Posição dos *arrays* de sensores de Bragg – representação em alçado.

Para compensação dos efeitos térmicos nas medições de extensões, foram instalados, em cada viga, 4 detetores resistivos de temperatura, do tipo PT100, em posições próximas dos sensores de Bragg.

2.3 Propriedades materiais

Foram moldados cubos com 150 mm de aresta e cilindros com diâmetro de 150 mm e comprimento de 300 mm para caracterização do módulo de elasticidade, E_c , e da resistência à compressão, f_c , do betão empregue em cada fase de betonagem. Foram realizados ensaios de caracterização aos 28 dias de idade do betão e à data do ensaio cíclico das vigas. A Tabela 1 apresenta os valores médios obtidos para os provetes cilíndricos. As armaduras utilizadas são da classe A500NR (LNEC 2008).

Tabela 1 – Resultados dos ensaios para caracterização das propriedades do betão.

Fase de betonagem	Idade do betão	Resultado médio
1ª fase	28 dias	$E_c = 36,7$ GPa $f_c = 54,5$ MPa
	66 dias (*)	$f_c = 57,8$ MPa
2ª fase	42 dias (*)	$E_c = 39,9$ GPa $f_c = 65,2$ MPa

NOTA: (*) Data do ensaio cíclico das vigas

2.4 Procedimento de ensaio

Cada uma das vigas foi submetida a um carregamento cíclico de amplitude constante. Previamente, foi aplicado um carregamento monotonicamente crescente até um valor máximo de 250kN, sendo esta carga suficiente para desenvolver um padrão de fendilhação com distâncias entre fendas, na zona mais tracionada, sensivelmente iguais à separação entre estribos.

O carregamento cíclico posterior segue uma variação sinusoidal, com valor máximo de 250 kN, valor mínimo de 50 kN e uma frequência da solicitação igual a 0,02 Hz. A frequência de aquisição de resultados foi de 2 Hz.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

Atendendo à boa repetibilidade observada nos ensaios das duas vigas, neste artigo apresentam-se apenas resultados para a viga 1.

Conforme foi referido, a caracterização detalhada das deformações de estruturas sujeitas a carregamentos cíclicos, incluindo a distribuição longitudinal de deformações nas armaduras, pode ter um papel relevante na validação e calibração de modelos numéricos avançados. Assim, os resultados experimentais obtidos são comparados com cálculos recorrendo a um modelo numérico, recentemente desenvolvido (Sousa 2012; Sousa et al. 2014), onde são considerados explicitamente modelos constitutivos detalhados para descrever o comportamento cíclico, quer ao nível da aderência entre as armaduras tracionadas e o betão envolvente, quer ao nível da relação entre a tensão normal à fenda e a abertura de fenda.

3.1 Resultados experimentais

A Fig. 6 apresenta as deformações medidas com os sensores do tipo PI e do tipo KG, ao longo dos 10 ciclos de carregamento iniciais. É importante notar que todos os valores medidos foram zerados num instante em que a força aplicada pelo atuador era nula, imediatamente antes de ser iniciado o carregamento. Os valores registados com os sensores do tipo *PI200mm*, localizados ao nível da zona comprimida na região de meio vão, mostram que os primeiros ciclos de carregamento conduzem a uma progressão negligenciável das deformações máximas. Pelo contrário, os resultados mostrados na Fig. 6 para os restantes sensores (localizados ao nível do banzo tracionado da viga), revelam uma progressão notória das deformações máximas ao longo dos ciclos.

Esta progressão resulta essencialmente da degradação das condições de aderência aço-betão, nos primeiros ciclos de carregamento. Os resultados dos sensores do tipo *KG100mm* e *PI300mm* revelam ainda a ocorrência de maiores deformações, ao nível do banzo inferior tracionado, do lado oeste. Esta falta de simetria é justificada por se tratarem de medições de carácter local, e pela largura considerável do provete de ensaio.

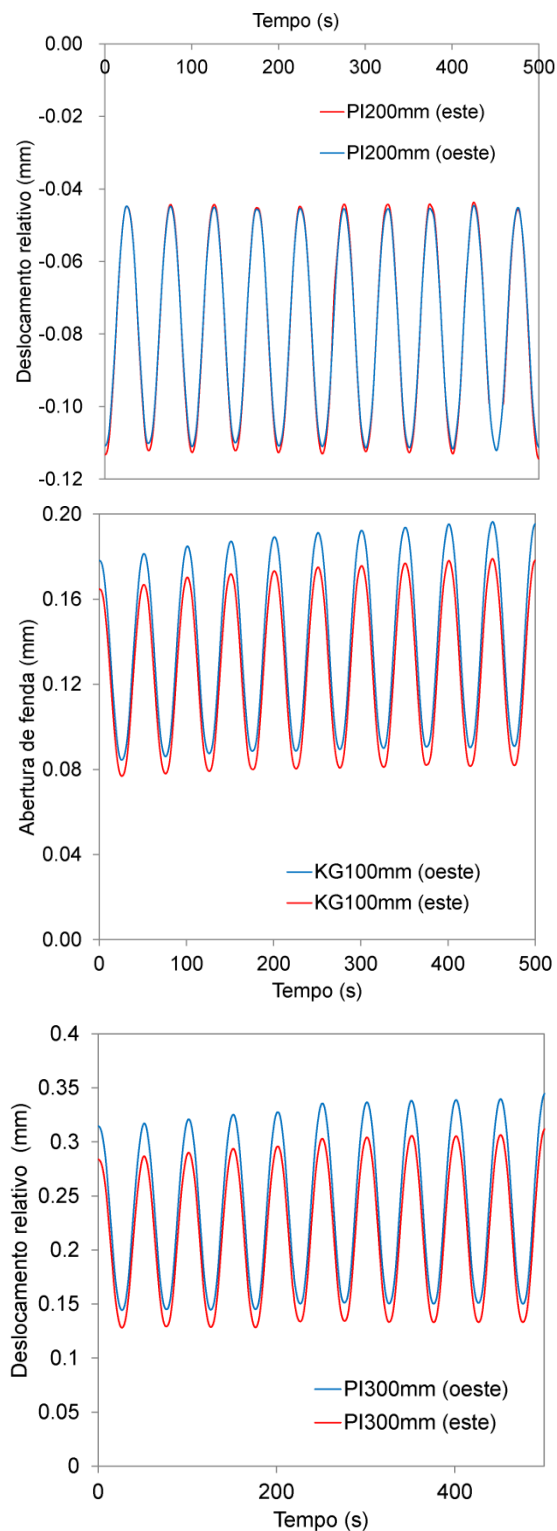


Fig. 6 – Deformações medidas na viga 1, durante os 10 primeiros ciclos de carregamento, pelos tradutores *PI200mm*, *KG100mm* e *PI300mm*.

Os resultados experimentais evidenciam também a existência de importantes deformações residuais após a descarga: no banzo tracionado, a deformação mínima em cada ciclo é sensivelmente igual a metade da deformação máxima, enquanto que a carga

mínima é cerca de um quinto da carga máxima. Essas deformações residuais devem-se, essencialmente, ao contacto imperfeito entre as faces das fendas e ao comportamento não-linear da interface entre os varões tracionados e o betão envolvente (relação entre a tensão de aderência e o deslizamento). Estes efeitos não devem portanto ser ignorados na análise estrutural pois incrementam os deslocamentos residuais e a abertura residual de fendas, que são relevantes para controlo da durabilidade.

No que diz respeito à distância entre fendas verificaram-se espaçamentos regulares, sensivelmente iguais a 150 mm, valor este que corresponde à distância entre estribos (o mapa de fendas observadas durante o ensaio está representado na Fig. 9). Este comportamento está de acordo com aquilo que era esperado. A distância entre fendas estimada através de modelos analíticos (Sousa 2012) é sensivelmente igual a 150 mm e, assim sendo, espera-se que as fendas ocorram na posição dos estribos, pois estes introduzem descontinuidades que funcionam como indutores de fendas.

3.2 Comparação entre resultados experimentais e numéricos

As Figs. 7 e 8 mostram a comparação entre os resultados medidos no primeiro ciclo de carregamento, ao nível do banzo tracionado (média entre os valores obtidos do lado este e do lado oeste), e os valores calculados.

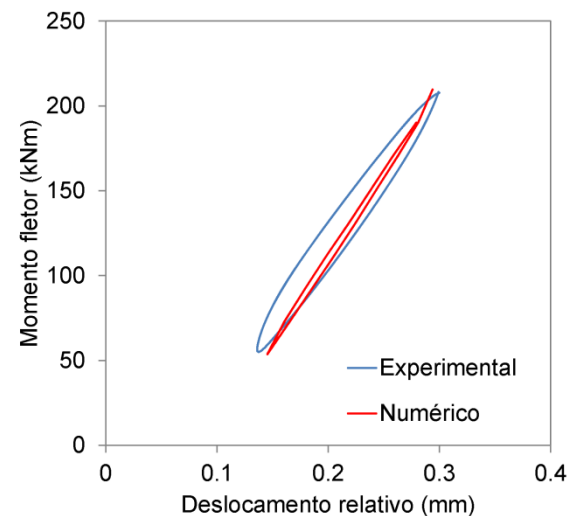


Fig. 7 – Relação entre o momento fletor aplicado e a deformação ao nível do sensor *PI300mm*, no primeiro ciclo de carregamento.

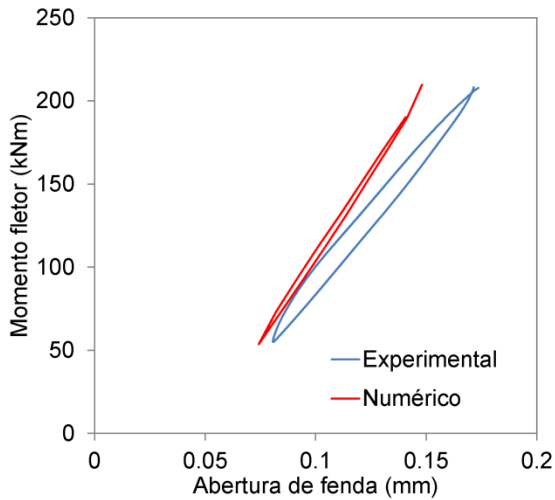


Fig. 8 – Relação entre o momento fletor aplicado e a deformação ao nível do sensor *KG100mm*, no primeiro ciclo de carregamento.

A Fig. 9 mostra a comparação entre as tensões medidas (deformações observadas multiplicadas pelo módulo de elasticidade do aço, com o valor de 200 GPa) nos varões da armadura principal da viga 1 e os valores calculados. Os resultados apresentados referem-se ao primeiro ciclo de carregamento, apresentando-se os resultados obtidos sob atuação da força máxima aplicada no ciclo (250 kN) e sob atuação da força mínima (50 kN).

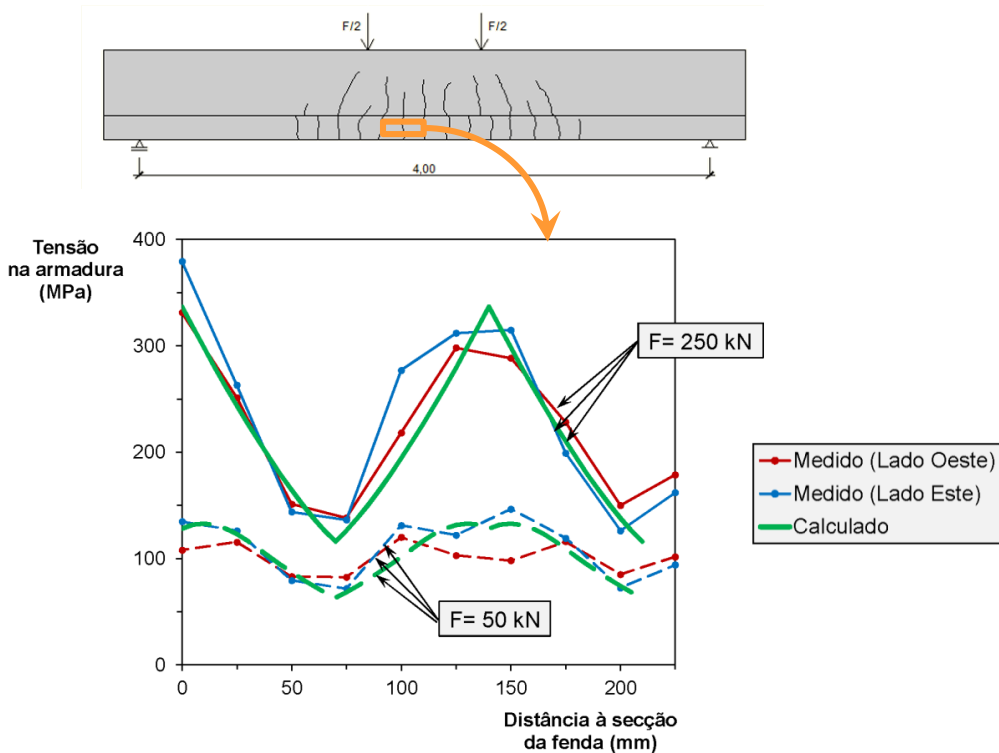


Fig. 9 – Comparação entre deformações medidas com sensores de Bragg e valores calculados. Resultados relativos ao primeiro ciclo de carregamento (teste com carregamento cíclico de amplitude constante) na viga 1.

A descrição detalhada do modelo de cálculo empregue pode ser encontrada na bibliografia (Sousa 2012; Sousa et al. 2014). As propriedades materiais consideradas nos cálculos cujos resultados se apresentam constituem estimativas plausíveis baseadas na caracterização dos materiais disponível:

- resistência à compressão do betão igual a 58 MPa;
- resistência à tração igual a 4 MPa;
- energia de fratura do betão igual a 0,1 kNm/m²;
- módulo de elasticidade do betão igual a 39,9 GPa;
- relação tensão normal-abertura de fenda de acordo com o modelo de Hordijk (1991), com recarga baseada na versão modificada do modelo FPM de Yankelevsky e Reinhardt (1989), conforme é descrito por Sousa et al. (2014);
- lei de aderência aço-betão com envolvente monotónica de acordo com a proposta de Farra (1995) para boas condições de aderência e ramos de descarga e recarga de acordo com a proposta de Sousa (2012).

A Fig. 9 mostra que há um bom acordo entre os valores calculados e os valores observados, quer sob atuação da força máxima, quer após descarga. Nesta figura é também possível observar a boa repetibilidade entre os valores medidos nos dois varões instrumentados. Ainda na mesma figura, olhando para as curvas que mostram a tensão sob atuação da força máxima (250 kN), podem observar-se picos coincidentes com as duas secções onde existem fendas. A distância entre fendas é sensivelmente igual a 150 mm, conforme previsto inicialmente. Olhando para as curvas que dão a variação da tensão ao longo do comprimento quando a viga está sujeita à carga mínima (50 kN), pode concluir-se que o modelo numérico reproduz de forma fiel a resposta medida, com variações significativas de tensão entre as secções das fendas e as secções de deslizamento nulo, entre fendas.

Atendendo à boa concordância entre valores medidos e calculados, em termos de tensões na armadura, seria de esperar uma boa concordância também em termos de deslocamentos relativos (medidos com os transdutores *PI300mm* e *KG100mm*) Nas Figs. 7 e 8 observa-se que os valores medidos com esses transdutores concordam bem com os valores calculados, quando se analisam os resultados sob atuação das forças máxima e mínima (250 kN e 50 kN). No entanto, olhando para a variação da resposta entre esses pontos extremos, pode concluir-se que, a histerese medida é significativamente superior à histerese calculada. Assim, verifica-se que os resultados medidos podem constituir uma base de dados importante para calibração dos modelos constitutivos utilizados para descrever o comportamento cíclico da ligação por aderência aço-betão, calibração essa que se encontra fora do âmbito do presente trabalho.

4. CONCLUSÕES

O presente artigo descreve o estudo do comportamento cíclico de vigas de betão armado fendilhadas, recorrendo a uma técnica recentemente desenvolvida para medição da deformação em varões de aço, em diversos pontos a diferentes distâncias da secção onde se verifica a existência de uma

fenda. Esta técnica recorre a *arrays* de sensores de deformação de Bragg, em fibra ótica, e permite realizar estas medições sem alterar (a menos de modificações mínimas, sem qualquer relevância prática) as propriedades dos varões instrumentados. Além disso, a técnica usada para medir as deformações não afeta as propriedades da ligação por aderência entre as armaduras tracionadas e o betão envolvente.

Concluiu-se que a técnica empregue permitiu caracterizar o comportamento cíclico das vigas ensaiadas, tendo-se verificado uma boa repetibilidade na resposta de sensores localizados em posições simétricas.

O facto de as medições com sensores de Bragg serem complementadas com outras, recorrendo a transdutores elétricos instalados exteriormente às vigas, permitiu validar as medições efetuadas. Recorrendo a um modelo, recentemente desenvolvido, para o estudo do comportamento cíclicos de elementos de BA fendilhados, foi possível concluir que, usando modelos constitutivos que descrevam o comportamento cíclico da ligação aço-betão e do betão tracionado, é possível estimar a resposta estrutural medida. A boa concordância obtida entre valores calculados e resposta medida com os diversos transdutores valida os procedimentos utilizados.

Os resultados experimentais obtidos evidenciaram a existência de importantes deformações residuais após a descarga. Essas deformações devem-se essencialmente ao contacto imperfeito entre as faces das fendas, e ao comportamento não-linear da interface entre os varões tracionados e o betão envolvente (relação entre a tensão de aderência e o deslizamento). Estes efeitos não devem portanto ser ignorados na análise estrutural, pois incrementam os deslocamentos residuais e as aberturas residuais de fendas, que são relevantes para controlo da durabilidade.

Foi também possível concluir que a relação cíclica entre momentos fletores atuantes e deformações médias na zona tracionada, para níveis de carregamento compatíveis com a fase de serviço de estruturas tais como tabuleiros de pontes, exhibe uma histerese significativa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, através do projeto intitulado *Tabuleiros Prefabricados Contínuos para Pontes Ferroviárias: Avaliação Experimental e Numérica (PTDC/ECM/68430/2006)*, e da ADI, através do projeto *SIPAV – Soluções Inovadoras Prefabricadas para Vias Férreas de Alta Velocidade*. A colaboração do Eng^o José Albano Sousa durante o fabrico das vigas ensaiadas é também reconhecida.

REFERÊNCIAS

- Bresler B, Bertero V (1968) Behavior of reinforced concrete under repeated load. *Journal of the Structural Division, ASCE* 94 (ST6):1567-1590
- CEN (2005) EN 10080 - Steel for the reinforcement of concrete - Weldable reinforcing steel - General. Brussels
- Delgado R, Calçada R, Goicolea JM, Gabaldon F (2008) Dynamics of High-Speed Railway Bridges, Selected and revised papers from the Advanced Course on “Dynamics of High-Speed Railway Bridges”, Porto, Portugal, 20-23 September 2005. Taylor and Francis,
- Gamski K (1973) Reinforcements for reinforced and prestressed concrete - I. Recommendations for reinforcing steels-recommendations applicable both to reinforcing steels and to prestressing steels. *Materials and Structures* 6 (32):79-118
- Judge RC, Scott RH, Gill PA (1989) Force transfer in compression lap joints in reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research* 41 (146):27-31
- Judge RC, Scott RH, Gill PA (1990) Strain and Bond Stress Distributions in Tension Lap Joints in Reinforced Concrete. *Magazine of Concrete Research* 42 (150):5-14
- Kankam CK (1997) Relationship of bond stress, steel stress, and slip in reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering* 123 (1):79-85
- Kenel A, Nellen P, Frank A, Marti P (2005) Reinforcing steel strains measured by Bragg grating sensors. *Journal of Materials in Civil Engineering* 17 (4):423-431
- Laurencet P (1999) Précontraint et armature pour contrôler l'ouverture résiduelle des fissures. PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, LAUSANNE
- LNEC (2008) E 450 - Varões de aço A500 NR para armaduras de betão armado. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (in Portuguese), Lisboa, Portugal
- Maek J, Wahab MA, Peeters B, De Roeck, G., De Visscher, J., De Wilde, W.P., Ndambi J-M, Vantomme J (2000) Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination. *Engineering Structures* 22 (10):1339-1349
- Mains RM (1951) Measurement of the distribution of tensile and bond stresses along reinforcing bars. *ACI Journal* 23 (3):225-252
- Neild SA, Williams MS, McFadden PD (2002) Non-linear behaviour of reinforced concrete beams under low-amplitude cyclic and vibration loads. *Engineering Structures* 24 (6):707-718
- Nellen PM, Frank A, Kenel A (2002) High strain and high strain gradients measured with fiber Bragg gratings in structural engineering applications. *The 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*:111-114
- Nilson AH (1972) Internal measurement of bond slip. *ACI Journal* 69 (7):439-441
- Rotilio J-D (1998) Contribution des actions variables aux déformations à long terme des ponts en béton. PhD Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne,
- Scott RH (1996) Intrinsic Mechanisms in Reinforced Concrete Beam-Column Connection Behavior. *ACI Structural Journal* 93 (3):1-11
- Scott RH, Beeby AW (2005) Long-Term Tension-Stiffening Effects in Concrete. *ACI Structural Journal* 102 (1):31-39
- Scott RH, Gill PA (1987) Short-term distributions of strain and bond stress along tension reinforcement. *The Structural Engineer* 65B (2):39-48
- Sousa CF (2012) Analysis of cyclic and long-term effects in continuous precast railway bridge decks. PhD Thesis, Portugal, Faculty of Engineering of the University of Porto, Porto
- Sousa CF, Calçada R, Serra Neves A (2014) Numerical evaluation of the non-linear behaviour of cracked RC members under variable-amplitude cyclic loading. Accepted for publication in *Materials and Structures* DOI: 10.1617/s11527-014-0356-x