

## **Influência da fendilhação em tabuleiros prefabricados contínuos de pontes ferroviárias**



**Carlos Sousa<sup>1</sup>**



**A. Serra Neves<sup>2</sup>**



**Rui Calçada<sup>3</sup>**

### **RESUMO**

Neste artigo apresenta-se uma metodologia para análise dos efeitos da fendilhação, em vigas submetidas a flexão composta, sob efeito de acções cíclicas. Esta metodologia considera explicitamente as propriedades de fractura do betão simples e as propriedades da aderência entre as armaduras traccionadas e o betão envolvente, tanto em fase de carga como em fase de descarga. Permite assim uma quantificação da rigidez (relação momento-curvatura) e da abertura de fendas durante a descarga, aspecto que tem merecido significativamente menos atenção por parte dos investigadores do que o comportamento durante a fase de carga.

Neste artigo, os resultados obtidos numericamente são comparados com os resultados experimentais obtidos por outros autores, verificando-se um bom ajuste.

Por fim, a metodologia apresentada é aplicada no estudo do comportamento dinâmico de tabuleiros prefabricados de pontes ferroviárias em linhas de alta velocidade (com ligação entre vigas realizada sem pré-esforço de continuidade). O exemplo apresentado evidencia a importância da quantificação rigorosa dos efeitos da fendilhação neste tipo de estruturas, para o cálculo da aceleração no tabuleiro durante a passagem de comboios de alta velocidade.

A metodologia apresentada neste artigo evidencia potencialidades para ser utilizada também noutras situações, nomeadamente na quantificação da rigidez de outros tipos de tabuleiros submetidos a acções cíclicas, onde ocorre fendilhação, ou na quantificação da abertura residual de fendas.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Betão armado, fendilhação, aderência, acções cíclicas, pontes, prefabricação

<sup>1</sup> Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 4200-465 Porto. cfsousa@fe.up.pt

<sup>2</sup> Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 4200-465 Porto. asneves@fe.up.pt

<sup>3</sup> Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 4200-465 Porto. ruiabc@fe.up.pt

## 1. INTRODUÇÃO

O comportamento de elementos de betão armado e pré-esforçado após uma solicitação que provoque fendilhação é um assunto que foi já alvo de numerosas investigações. No entanto, muito menos atenção foi dada à modelação numérica do comportamento de elementos fendilhados durante a fase de descarga. No final do século passado foi desenvolvida na École Polytechnique Fédérale de Lausanne investigação neste domínio, incidindo sobre a quantificação da abertura residual de fissuras [1] e sobre a quantificação da deformação residual de elementos fendilhados sujeitos a acções cíclicas [2]. Posteriormente, foi desenvolvida uma metodologia simplificada para esse efeito [3].

O objectivo principal da metodologia agora apresentada consiste na quantificação da rigidez (relação momento-curvatura) de vigas fendilhadas submetidas a carregamentos cíclicos. Este trabalho foi motivado pela necessidade de quantificar de modo rigoroso a influência da fendilhação sobre a rigidez dos tabuleiros de pontes ferroviárias em vias de alta velocidade. Nestas estruturas, é requerida pelos regulamentos de projecto a realização de análises dinâmicas, para quantificação da aceleração máxima e da amplificação dinâmica de esforços durante a passagem de comboios. Ora, a rigidez é um dos parâmetros que influencia de forma determinante o comportamento dinâmico. Em secções onde a tensão actuante no betão ultrapassa a sua resistência à tracção, os efeitos da fendilhação devem ser tidos em conta durante a realização das análises dinâmicas. O Model Code 1990 [4] apresenta um procedimento simplificado para quantificação da relação momento-curvatura durante a descarga e a recarga, mas apenas para elementos submetidos a flexão simples.

Neste artigo, é apresentada a aplicação da metodologia referida no estudo de tabuleiros contínuos de pontes ferroviárias construídos com vigas pré-fabricadas, sem recorrer a pré-esforço de continuidade (sendo a resistência a momentos flectores negativos assegurada por armaduras ordinárias - Fig. 1). Esta solução tem sido utilizada nas linhas ferroviárias de alta velocidade de França e Espanha, em tabuleiros com vãos até cerca de 35m. Quando comparada com a solução que recorre a pré-esforço de continuidade, esta tecnologia construtiva apresenta uma vantagem óbvia: conduz a uma simplificação das tarefas a realizar em obra, o que constitui um dos objectivos principais da prefabricação. Esta solução construtiva constitui uma das situações onde tem interesse a aplicação da metodologia de análise de elementos fendilhados apresentada neste artigo. De facto, é neste caso importante a correcta quantificação do decréscimo de rigidez na região dos apoios causada pela fendilhação e da abertura residual de fendas (por questões de durabilidade).

No final deste artigo apresentam-se os pontos que estão ainda em desenvolvimento no âmbito da investigação agora apresentada.

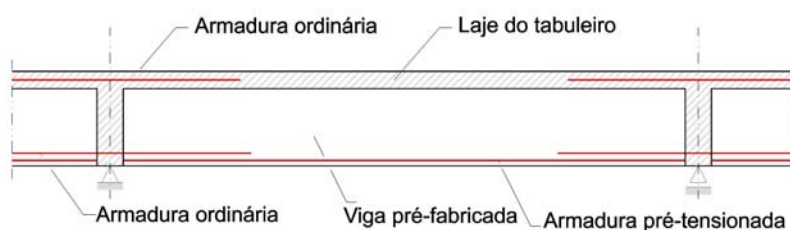


Figura 1. Representação esquemática do sistema estrutural de tabuleiros prefabricados contínuos sem pré-esforço de continuidade.

## 2. DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo de cálculo analisa o comportamento de um segmento de viga localizado entre a secção transversal da fenda e a secção transversal mais próxima onde é nulo o deslizamento entre a armadura principal de tracção e o betão envolvente. Transversalmente, a secção é discretizada em camadas. Longitudinalmente, a viga é dividida em troços com o comprimento  $\Delta x$ , considerando-se constante a tensão de aderência ao longo desse comprimento. Nos exemplos apresentados neste artigo,  $\Delta x$  toma o valor de 1mm. O equilíbrio da armadura principal de tracção é expresso pela Eq. 1, que estabelece que a variação de força no aço,  $\Delta \sigma_{si} \cdot A_s$ , é igual à força de aderência,  $n \cdot \pi \cdot \phi \cdot \tau_i \cdot \Delta x$ . A compatibilidade de deformações é expressa pela Eq. 2, que estabelece que a variação do deslizamento entre a armadura e o betão,  $\Delta s_i$ , é dada pela diferença entre o alongamento do aço,  $\varepsilon_{si} \cdot \Delta x$ , e o alongamento do betão envolvente da armadura,  $\varepsilon_{ci} \cdot \Delta x$ .

$$\Delta \sigma_{si} \cdot A_s = n \cdot \pi \cdot \phi \cdot \tau_i \cdot \Delta x \quad (1)$$

$$\Delta s_i = \varepsilon_{si} \cdot \Delta x - \varepsilon_{ci} \cdot \Delta x \quad (2)$$

A lei de aderência, na carga e na descarga, é representada na Fig. 3, de acordo com o estado actual do conhecimento [1]. Nesta figura,  $\tau$  representa a tensão tangencial,  $s$  representa o deslizamento entre a armadura e o betão envolvente,  $f_{cm}$  representa o valor médio da resistência do betão à compressão,  $n$  representa o número de ciclos de carregamento, e  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$ ,  $s_1$ ,  $k$  e  $\alpha$  são parâmetros obtidos a partir de ensaios de aderência.

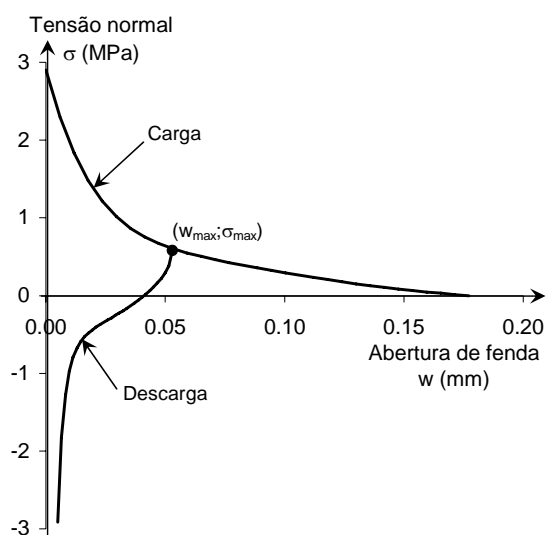


Figura 2. Relação tensão-abertura de fendas [5,6].

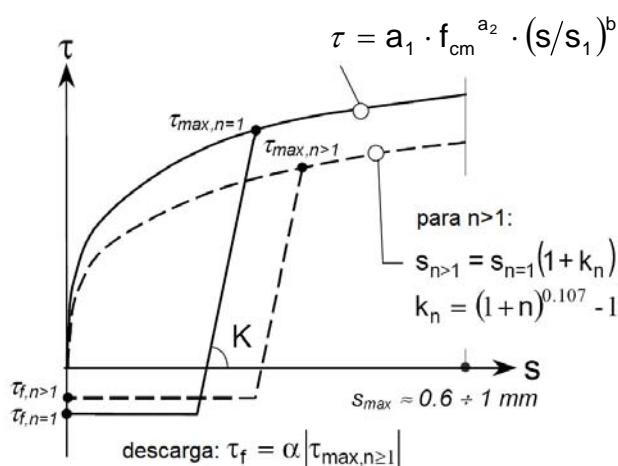


Figura 3. Lei de aderência [1].

Transversalmente, a compatibilidade de deformações entre as diversas camadas de betão e de armadura é garantida pela hipótese das secções planas de Bernoulli. Na secção da fenda, a relação entre a tensão normal e a abertura de fenda é dada pelo modelo de Hordijk [5, 6], ilustrado na Fig. 2. Nas restantes secções, a deformação das camadas de betão traccionado são compatibilizadas por um plano retraído relativamente à secção plana, em resultado do deslizamento entre as armaduras e o betão (hipótese adoptada por outros autores que usaram modelos semelhantes – ver [2]). A descrição detalhada deste modelo, incluindo o procedimento iterativo implementado para determinação da solução, é apresentada em [7].

As Figs 4 a 6 ilustram resultados que podem ser obtidos com o modelo. A secção transversal em análise é a representada na Fig. 8, e está sujeita a um esforço axial de compressão de 7550kN e a um momento flector variável entre 24950kNm e 17200kNm (valores referidos ao centro de rigidez em estado 1). Os resultados apresentados nas Figs 4 e 5 correspondem ao último ciclo de carga e descarga após  $10^6$  ciclos de carregamento.

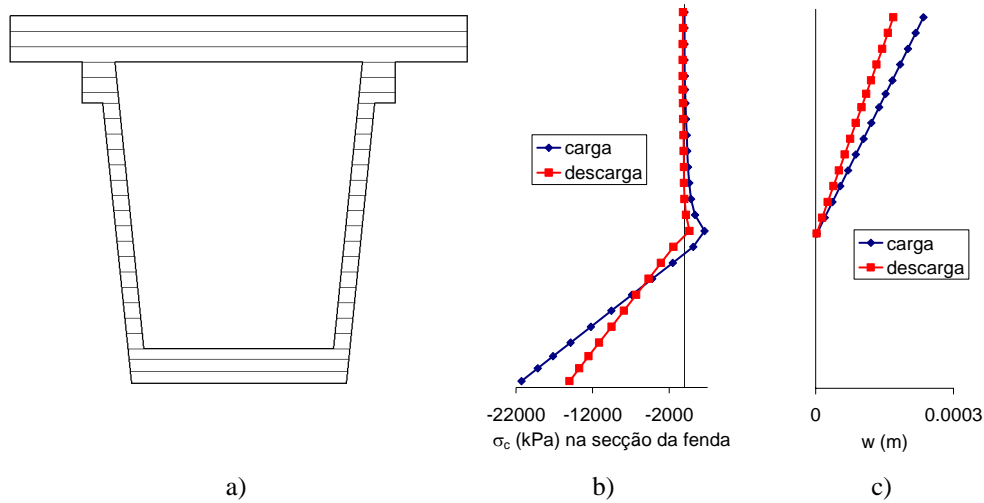


Figura 4. a) Discretização da secção em camadas; b) Diagrama de tensões normais na secção da fenda; c) Abertura de fenda.

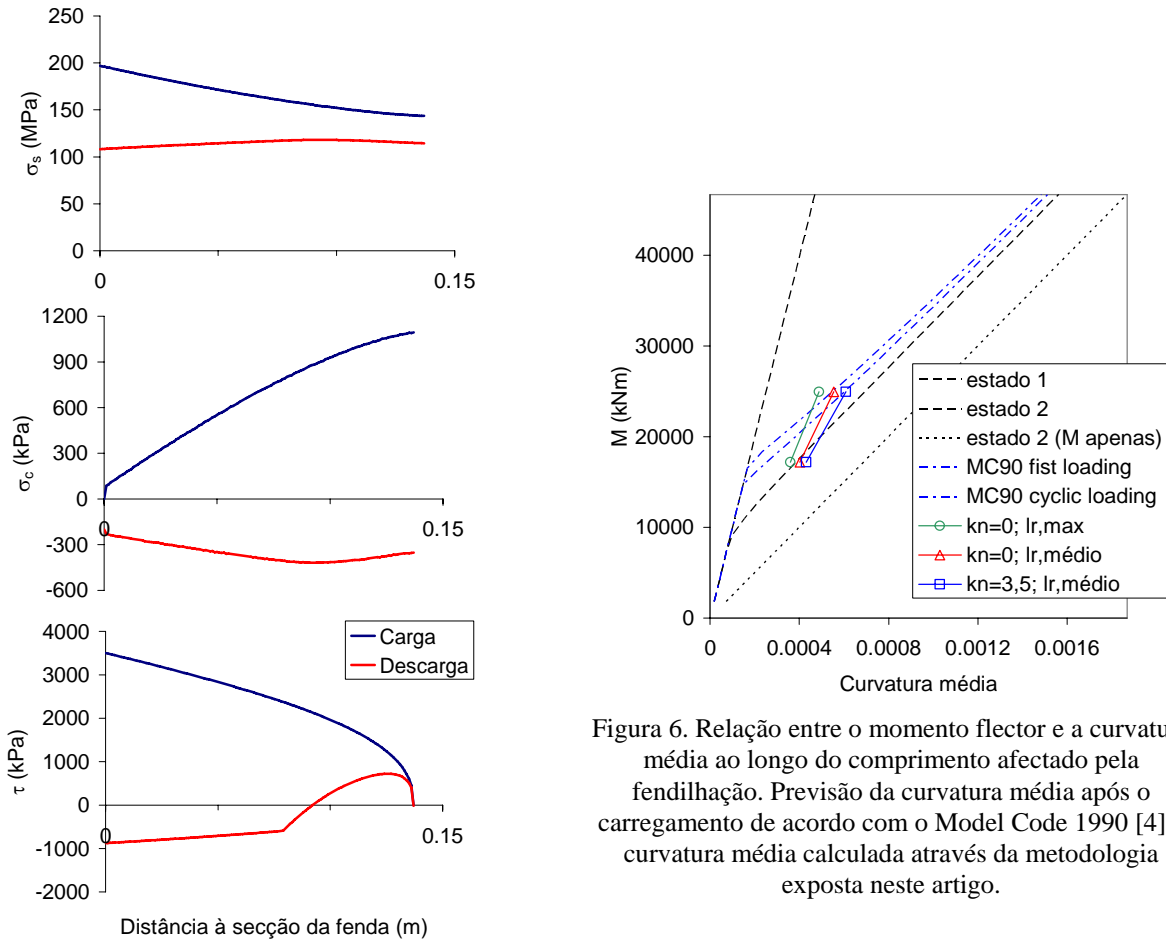


Figura 6. Relação entre o momento flector e a curvatura média ao longo do comprimento afectado pela fendilhação. Previsão da curvatura média após o carregamento de acordo com o Model Code 1990 [4] e curvatura média calculada através da metodologia exposta neste artigo.

Figura 5. Tensão na armadura,  $\sigma_s$ , tensão no betão envolvente da armadura,  $\sigma_c$ , e tensão de aderência,  $\tau$ , após cargas cíclicas (variação entre a secção da fenda e a secção de deslizamento nulo).

A Fig. 6 apresenta os valores calculados para a curvatura média em função do momento flector aplicado. Para além dos valores relativos ao estado 1 (secção não fendilhada) e estado 2 (ignorando o betão traccionado) apresentam-se os valores estimados pelo Model Code 1990 [4] para a curvatura média após o primeiro carregamento e após um número elevado de ciclos. Apresentam-se também os

valores cálculos, com o modelo agora apresentado, para ciclos carga-descarga.  $k_n=0$  identifica a primeira carga e descarga.  $k_n=3,5$  identifica os resultados após  $10^6$  ciclos de carregamento.  $l_{r,médio}$  significa que os resultados se referem a um cálculo em fase de fendilhação estabilizada, considerando uma distância máxima entre fendas igual a  $2/3$  do seu espaçamento máximo. No diagrama momento-curvatura, o declive da recta que une os pontos relativo à carga e à descarga constitui a rigidez da secção para carregamentos cíclicos.

## 2. COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados fornecidos pelo modelo numérico apresentado neste artigo foram comparados com os resultados experimentais obtidos por Rotilio [2], durante o ensaio de vigas comprimidas, sujeitas a momentos flectores ciclicamente aplicados. A Fig. 7 apresenta a relação momento-curvatura obtida experimentalmente (primeiro carregamento, primeira descarga e última descarga após 7000 ciclos). Apresenta também os resultados calculados com o modelo exposto neste artigo (primeira descarga e última descarga após 7000 ciclos). A descrição dos parâmetros utilizados na modelação numérica é feita em [7]. Nos gráficos, o valor mais elevado do momento flector representado no eixo das ordenadas é aquele que provoca a cedência das armaduras. Representa-se também a relação momento-curvatura relativo em estado 1 (secção não fendilhada), em estado 2 (ignorando o betão traccionado) e prevista pelo Model Code 1990 [4] para a curvatura média após a carga.

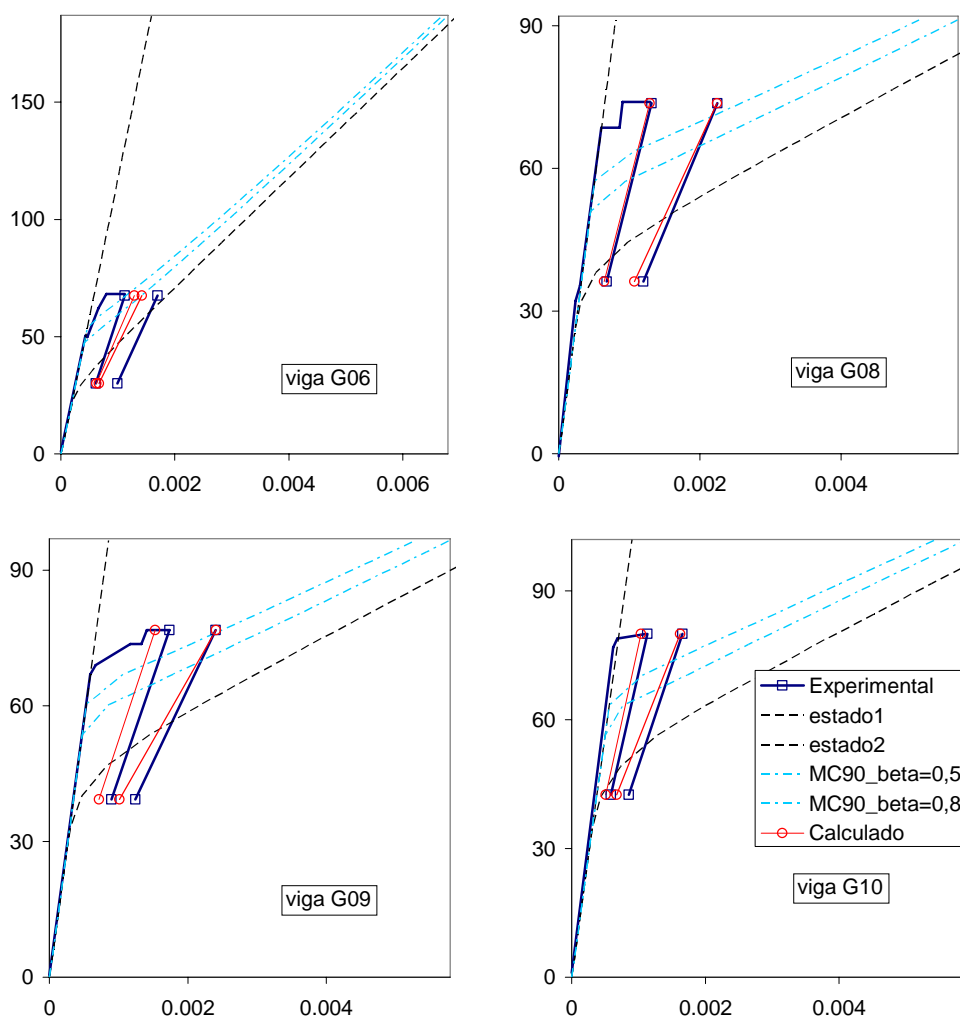


Figura 7 – Diagramas momento-curvatura das vigas testadas por Rotilio [2]. Em abscissas: curvatura média. Em ordenadas: momento flector (kNm).

Na Fig. 7 verifica-se que o modelo numérico foi capaz de prever de forma satisfatória os resultados experimentais, quer após a carga, quer na descarga. Em [7] apresenta-se ainda a comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais obtidos por outros autores.

### 3. CASO PRÁTICO

Apresenta-se a seguir a aplicação do modelo exposto atrás para a análise de um tabuleiro de ponte ferroviária, construído com vigas pré-fabricadas tipo “U”, ligadas em continuidade sobre os apoios, sem recorrer a pré-esforço de continuidade. A ponte possui 4 vãos, tendo os centrais 33,5m de comprimento e os 2 vãos extremos 26,5m de comprimento.

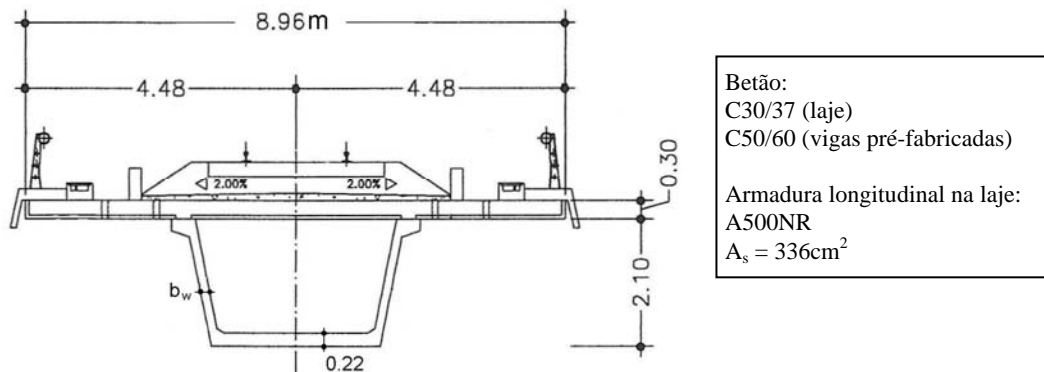


Figura 8. Secção transversal do caso prático em estudo.

#### 3.1 Rigidez após a fendilhação – Análise paramétrica

As Figs 9 e 10 apresentam resultados de uma análise paramétrica do comportamento de uma secção fendilhada, sob a acção de ciclos de carregamento. Os resultados apresentados são relativos à secção localizada a 2,30m do eixo do apoio de continuidade. O momento flector máximo tem o valor 24950kNm (corresponde ao efeito das cargas permanentes e da envolvente das sobrecargas ferroviárias), o momento flector mínimo tem o valor 17200kNm (efeito das cargas permanentes apenas) e o esforço axial de compressão vale 7550kN. Os esforços apresentados incluem o efeito do pré-esforço por pré-tensão e referem-se ao centro de rigidez da secção em estado 1. Considerou-se uma largura efectiva do banzo traccionado igual a 5,96m (de acordo com o preconizado na EN 1992-1-1 [8]).

Na análise paramétrica fizeram-se variar os seguintes parâmetros cuja quantificação é mais incerta (entre parêntesis indica-se a etiqueta de cada valor, etiqueta essa que é usada nos gráficos das Figs 9 e 10 para identificar o valor empregue em cada análise):

- ramo da carga da lei de aderência, tendo-se considerando a lei definida no MC90[4] para más condições de aderência (A1) e para boas condições de aderência (A2) e a lei adoptada por Laurencet (A3);
- a resistência à tracção do betão,  $f_{ct}$ , tomando valores de 2MPa (F1) e 3,8MPa (F2);
- a energia de fractura do betão,  $G_F$ , tomando valores de 0,05kN/m (G1) e 0,15kN/m (G2);
- o parâmetro  $\alpha$  relativo à fase de descarga da lei de aderência, tomando os valores 0,10 (a1) e 0,35 (a2);
- o parâmetro  $k$  relativo à fase de descarga da lei de aderência, tomando os valores  $200 \times 10^6 \text{kPa/m}$  (K1) e  $1000 \times 10^6 \text{kPa/m}$  (K2).

A Fig. 9 apresenta os resultados após  $10^6$  ciclos de carregamento, para as 12 combinações possíveis dos parâmetros “ramo de carga da lei de aderência” (legendado com A),  $f_{ct}$  (legendado com F) e  $G_F$  (legendado com G). Essa figura conduz às seguintes conclusões principais:

- a curvatura média após o carregamento é pouco sensível à variação da lei de aderência;
- valores maiores de  $f_{ct}$  e de  $G_F$  resultam em menor curvatura média após o carregamento;

- a variabilidade da abertura de fendas após o carregamento é muito superior à variabilidade da curvatura média;
- a abertura de fendas após a carga é muito sensível à variação da lei de aderência;
- a abertura de fendas é sensível à variação da resistência à tracção (maior resistência à tracção origina maior distância entre fendas e, consequentemente, maior abertura de fendas).

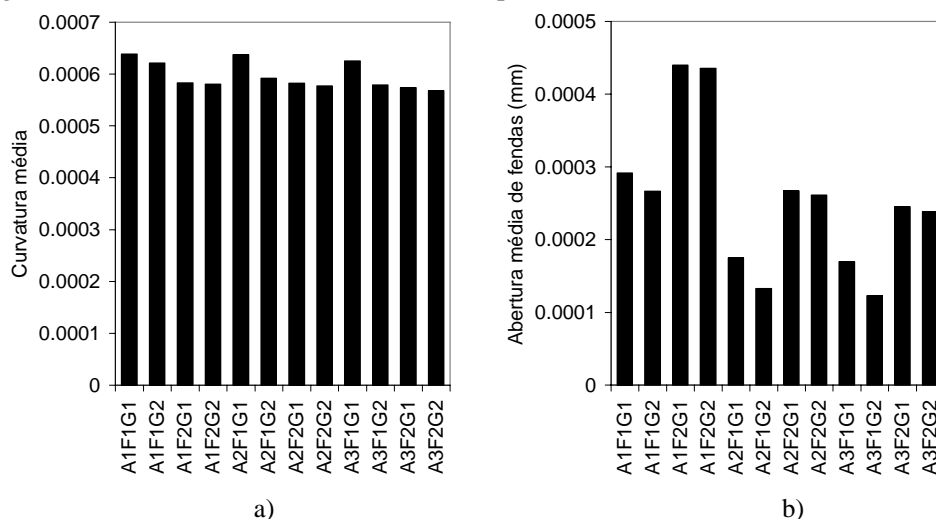


Figura 9. Resultados da análise paramétrica: a) curvatura média após o último carregamento; b) abertura média de fendas após o último carregamento.

A Fig. 10 apresenta a rigidez (relação entre momento e curvatura média) para carregamentos cíclicos, após  $10^6$  ciclos de carregamento. Tal como foi referido anteriormente, esta rigidez é determinada com base no cálculo da curvatura média após a carga e após a descarga. Na Fig. 10, a rigidez para carregamentos cíclicos é expressa em percentagem da rigidez em estado 1 (secção não fendilhada), para as 48 combinações possíveis de parâmetros. Esta análise paramétrica conduz às seguintes conclusões principais:

- a variação da lei de aderência (ramo da carga) influencia de modo pouco significativo a rigidez na descarga;
- a rigidez na descarga é maior quando se considera maior resistência à tracção;
- relativamente aos parâmetros que influenciam a descarga na lei de aderência,  $\alpha$  e  $k$ , verifica-se que a rigidez na descarga é maior quando se considera valores elevados de  $\alpha$  e  $k$ ;
- o valor mais baixo da rigidez equivalente na descarga (33,6% da rigidez em estado 1) acontece quando se considera baixa aderência na carga, baixa resistência à tracção, baixa energia de fractura e valores baixos para os parâmetros  $\alpha$  e  $k$ .

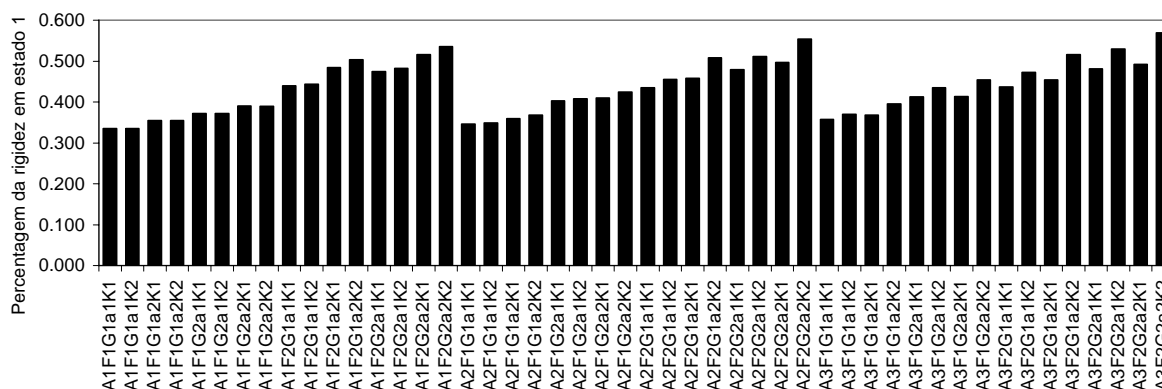


Figura 10. Resultados da análise paramétrica: Rigidez da relação momento curvatura, no último ciclo de carga e descarga, expressa em percentagem da rigidez em estado 1.

Verifica-se ainda, na Fig. 10, que a variabilidade associada à quantificação da rigidez não é muito acentuada. De facto, para a secção em análise, a consideração de valores médios para os parâmetros intervenientes no cálculo conduz a uma rigidez para carregamento cíclicos igual a 44% da rigidez em estado 1. A realização de uma análise paramétrica conduz a valores que variam entre 34% e 57% (Fig. 10).

### 3.2 Comportamento dinâmico sob o efeito da passagem de comboios

Para avaliar as implicações da fendilhação sobre o comportamento dinâmico do tabuleiro em estudo, procedeu-se à análise do seu comportamento dinâmico para dois cenários:

- ignorando os efeitos da fendilhação;
- considerando, nas secções onde é ultrapassada a resistência à tracção, a rigidez para carregamentos cíclicos de acordo com o procedimento apresentado neste artigo (Fig. 11).

O cálculo foi realizado usando um programa desenvolvido para análises do comportamento dinâmico e dos efeitos de fadiga durante a passagem de comboios [9], que interage com o software DIANA [10].

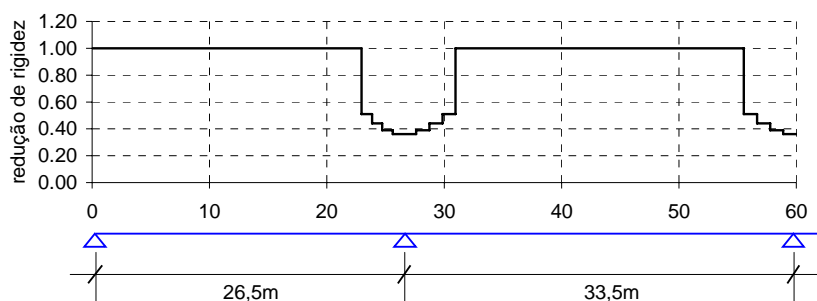


Figura 11. Rigidez para carregamentos cíclicos, após  $10^6$  ciclos, considerando valores médios das propriedades materiais.

O Quadro 1 apresenta as 8 primeiras frequências próprias de vibração, resultantes da análise dos dois cenários. Verifica-se que uma ligeira diminuição das frequências em resultado da consideração da fendilhação (note-se que os 8 primeiros modos têm a mesma configuração em ambos os cenários).

Quadro 1. Frequências própria de vibração (Hz).

	<i>Modo 1</i>	<i>Modo 2</i>	<i>Modo 3</i>	<i>Modo 4</i>	<i>Modo 5</i>	<i>Modo 6</i>	<i>Modo 7</i>	<i>Modo 8</i>
Sem fendilhação	3,730	5,042	6,809	7,561	14,131	17,097	22,377	23,219
Com fendilhação	3,579	4,581	6,120	6,407	13,054	15,366	21,007	21,493

A Fig. 12 apresenta a envolvente das acelerações verticais máximas, a meio do segundo vão, em resultado da passagem dos 10 comboios do modelo de carga HSLM-A definido na EN 1991-2 [11]. Verifica-se que a consideração da fendilhação origina uma diminuição das velocidades de ressonância dos comboios 1, 6, 7, 8 e 9. Assim, no cenário em que é considerado o efeito da fendilhação, registam-se acelerações verticais significativamente superiores a  $3,5\text{m/s}^2$  (limite regulamentar para ser garantida a estabilidade do balastro). No entanto isso só ocorre, neste caso, para velocidades de circulação elevadas. Deste modo, as acelerações elevadas só inviabilizariam a utilização desta estrutura numa linha de alta velocidade se a velocidade da linha no local da ponte fosse superior a cerca de 310km/h.

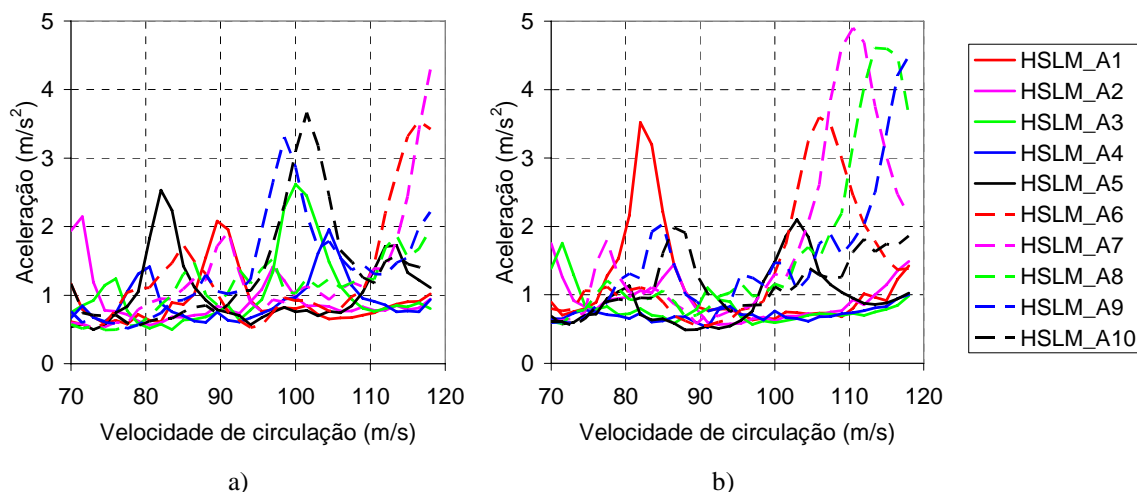


Figura 12. Aceleração vertical máxima a meio do segundo vão: a) sem considerar o efeito da fendilhação; b) considerando o efeito da fendilhação.

#### 4. CONCLUSÕES

Numerosos trabalhos de investigação têm sido dedicados ao estudo do comportamento de elementos de betão armado e pré-esforçado em fase fendilhada. No entanto, muito poucos têm incidido sobre o comportamento durante a descarga, aspecto este que é relevante nas situações em que interessa determinar a abertura residual de fendas, a deformação residual, ou a rigidez sob actuação de cargas cíclicas. Neste artigo, apresentou-se uma metodologia para análise do comportamento de vigas fendilhadas, sob o efeito das acções cíclicas, considerando explicitamente as propriedades de fractura do betão simples e as propriedades da aderência entre as armaduras traccionadas e o betão envolvente, tanto em fase de carga como em fase de descarga.

Os resultados numéricos fornecidos por esta metodologia foram comparados com resultados experimentais de outros autores, tendo-se verificado boa concordância.

Através da análise paramétrica de um caso prático, verificou-se que a rigidez de elementos fendilhados (sob acções cíclicas) é menos sensível à variação dos parâmetros que caracterizam a lei de aderência do que a abertura de fendas. Assim, é possível prever com algum rigor o comportamento deformacional de elementos fendilhados sob a acção de carregamentos cíclicos.

Verificou-se que é importante a consideração dos efeitos da fendilhação durante a análise do comportamento dinâmico de tabuleiros de pontes ferroviárias, tendo-se apresentado uma metodologia para o fazer. A ocorrência da fendilhação provoca uma diminuição das frequências próprias de vibração e das velocidades de ressonância, e um aumento da aceleração vertical máxima do tabuleiro. Apesar disso, são possíveis soluções construtivas onde não seja evitada a fendilhação em todos os pontos da estrutura, desde que os efeitos da fendilhação sejam convenientemente tidos em consideração durante a fase de projecto.

#### 5. DESENVOLVIMENTOS EM CURSO

O trabalho agora apresentado encontra-se em fase de desenvolvimento, estando a ser implementados e validados procedimentos para consideração das deformações por fluência e por retracção, e para análise do efeito de carregamentos com amplitudes variáveis. Além disso, está em curso trabalho de caracterização do comportamento cíclico do betão traccionado e comprimido, e da aderência aço-betão.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do projecto de investigação “PTDC/ECM/68430/2006 - Continuous precast bridge decks for railway bridges: numerical and experimental assessment”. O primeiro autor agradece ainda o apoio financeiro da FCT, através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/29125/2006.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] LAURENCET, Pierre – Précontrainte et armature pour controller l’ouverture résiduelle des fissures. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1999. 254 p. Tese de Doutoramento. ISBN 90-9004519-8.
- [2] ROTILIO, Jean-Daniel – Contribution des actions variables aux deformations à long terme des ponts en béton. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998. 194 p. Tese de Doutoramento.
- [3] MUTTONI, A.; RUIZ, M.F. - Concrete Cracking in Tension Members and Application to Deck Slabs of Bridges. Journal of Bridge Engineering, ASCE, vol. 12, no. 5, 2007. pp. 646-653.
- [4] CEB, Comité Euro-International du Béton - CEB-FIP Model Code 1990. Thomas Telford. 1993. ISBN 0 7277 1696 4.
- [5] HORDIJK, Dirk Arend – Local approach to fatigue of concrete. Delft: Technische Universiteit Delft, 1991. 209 p. Tese de Doutoramento.
- [6] HORDIJK, Dirk Arend – Tensile and tensile fatigue behaviour of concrete; experiments, modeling and analyses. HERON, vol. 37, no. 1, 1992. pp. 1-79. ISSN 0046-7316.
- [7] SOUSA, C.; CALÇADA, R.; SERRA NEVES, A. – Cálculo da curvatura média e da abertura de fendas em elementos fendilhados sujeitos a cargas cíclicas, considerando as propriedades locais do betão e da aderência. Relatório. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (ainda não publicado).
- [8] CEN, Comité Européen de Normalisation – EN1992-1-1-Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [9] SOUSA, C.; CALÇADA, R.; SERRA NEVES, A. - Dynamic analysis and fatigue verification of precast bridge decks for high speed railways lines using DIANA. International DIANA Users Meeting. Porto, 2007.
- [10] TNO DIANA BV - DIANA User's Manual - Release 9.2. Delft, The Netherlands. 2007.
- [11] CEN, Comité Européen de Normalisation - EN1991-2-Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges. Brussels. 2003.