

## **Avaliação experimental do comportamento cíclico de ligações de continuidade em pontes pré-fabricadas**

**L. Corrêa**<sup>1</sup>

**R. Valente**<sup>2</sup>

**C. Sousa**<sup>3</sup>

**M. Pimentel**<sup>4</sup>

### **RESUMO**

A comunicação refere-se à realização de ensaios cíclicos em dois modelos à escala reduzida de ligações de continuidade entre vigas pré-fabricadas de pontes ferroviárias, de forma a compreender o comportamento de diferentes soluções para a ligação, sob esse tipo de carregamento. O primeiro modelo é composto por vigas pré-fabricadas e pré-tensionadas em betão convencional, sendo a ligação de continuidade em betão armado, sem pré-esforço de continuidade. O segundo modelo é composto por vigas pré-fabricadas e pré-tensionadas em betão de elevado desempenho reforçado com fibras de aço (HPFRC), sendo a ligação de continuidade materializada com um compósito cimentício de ultraelevado desempenho reforçado com fibras de aço (UHPFRC) e armadura ordinária.

A taxa de armadura na laje dos modelos é similar à dimensionada para um caso de estudo de uma ponte ferroviária contínua, com vãos interiores de 35 m, sujeita a tráfego pesado e de alta velocidade, e os carregamentos aplicados nos ensaios também foram determinados de forma a provocarem níveis de tensão nas armaduras próximos aos do caso de estudo. Os ensaios consistem na aplicação de 200 000 ciclos de carregamento, aumentando o nível e a amplitude da carga após os primeiros 100 000 ciclos. Em trabalhos futuros, ao fim dos ensaios cíclicos, as vigas serão levadas à rotura.

Este estudo tem como objetivo compreender a degradação da rigidez e o aumento da deformação e fissuração ao longo do tempo, assim como o impacto do carregamento cíclico e o efeito das fibras na resistência à flexão em estado limite último, pelo que os dois modelos foram dimensionados para terem uma resistência à flexão semelhante.

**Palavras-chave:** Ensaios de fadiga; Pontes ferroviárias; Betão pré-fabricado; Betão reforçado com fibras; Betão de elevado desempenho

### **1. INTRODUÇÃO**

Este trabalho tem como caso de estudo tabuleiros contínuos de pontes ferroviárias com via dupla e de alta velocidade, com vigas pré-fabricadas e pré-tensionadas, com secção transversal tipo “I”, e com vãos interiores de até 35 m. É avaliada a viabilidade das vigas serem moldadas com HPFRC no lugar do betão convencional, aligeirando a secção transversal e reduzindo a quantidade de armaduras ordinárias. São analisadas duas soluções para a ligação de continuidade entre tramos, ambas sem pré-esforço para resistir a momentos fletores negativos. Uma consiste numa solução convencional em betão armado.

---

<sup>1</sup> CONSTRUCT-LABEST, FEUP, Porto, Portugal. up201800082@edu.fe.up.pt

<sup>2</sup> CONSTRUCT-LABEST, FEUP, Porto, Portugal. up201206018@edu.fe.up.pt

<sup>3</sup> CONSTRUCT-LABEST, FEUP, Porto, Portugal. cfsousa@fe.up.pt

<sup>4</sup> CONSTRUCT-LABEST, FEUP, Porto, Portugal. mjsp@reit.up.pt

Outra utiliza UHPFRC e armadura ordinária. Estes tabuleiros já foram estudados e dimensionados em trabalhos anteriores no âmbito do Projeto iPBRAIL – Innovative Precast Bridges for RAILways [1-3].

Sendo assim, foram ensaiados dois modelos à escala reduzida, o primeiro (V1) com vigas e ligação de continuidade em betão convencional, e o segundo (V2) com vigas em HPFRC e ligação de continuidade em UHPFRC.

Estes novos materiais apresentam alta resistência à compressão e melhorias no seu comportamento à tração, quando comparados ao betão convencional, devido à inclusão de fibras de aço em uma matriz cimentícia densa. Isto resulta em elementos estruturais mais leves, facilitando o transporte e a montagem dos elementos pré-fabricados, proporciona uma redução na quantidade de armadura necessária em áreas críticas e maior durabilidade, exigindo menos manutenção durante a vida útil da estrutura.

O HPFRC apresenta um alto potencial para o desenvolvimento de novos produtos, como vigas pré-fabricadas, adequados para um processo de construção industrializado. E o UHPFRC apresenta um alto potencial para o desenvolvimento de novas soluções para a ligação de continuidade *in-situ* entre elementos pré-fabricados, permitindo a criação de soluções que combinem simplicidade de execução e durabilidade.

Com este trabalho, pretende-se compreender o comportamento destes novos materiais sob carregamento cíclico, nomeadamente o aumento da rigidez e o melhor controlo da fissuração proporcionados pela utilização de UHPFRC, localizadamente, na zona de ligação, em tabuleiros de pontes de médio vão. Pretende-se então avaliar esse comportamento sob atuação de carregamento cíclico, e quando a estrutura é carregada até à rotura.

A Fig. 1 apresenta a vista longitudinal de um dos tabuleiros ferroviários do caso de estudo, com vãos interiores de 35 m e ligação de continuidade em UHPFRC, com destaque para a zona de ligação da estrutura, zona alvo dos ensaios de fadiga realizados.

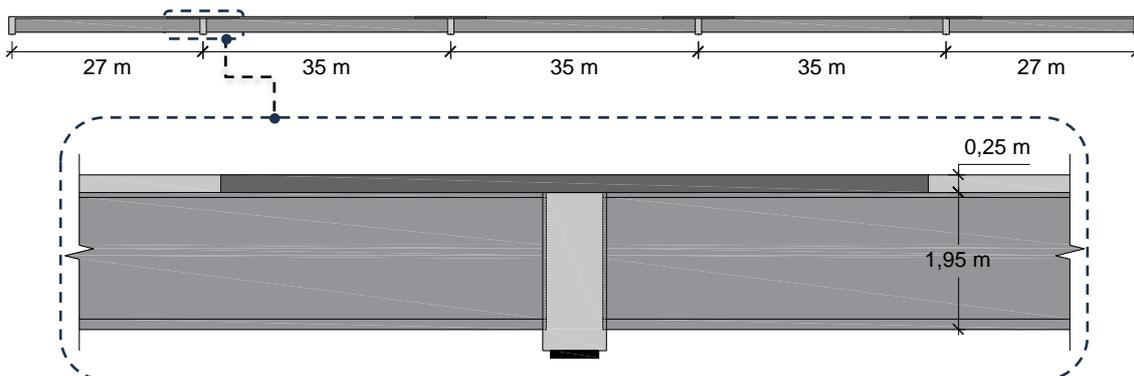


Figura 1. Vista longitudinal da estrutura à escala real e da zona de ligação de continuidade.

## 2. MODELOS E SETUP PARA OS ENSAIOS LABORATORIAIS

Os modelos ensaiados (V1 e V2) podem ser observados nas Figs. 2 e 3. Cada modelo é constituído por dois segmentos de viga pré-fabricada. A ligação de continuidade entre eles é feita através da betonagem da laje e de um segmento de uma viga transversal (carlinga) que, no modelo ensaiado, tem uma largura de 34 cm. Cada viga pré-fabricada é embebida na carlinga num comprimento de 2 cm apenas, para dessa forma não interferir com a colocação das armaduras na carlinga. Nos topos das vigas pré-fabricadas, as únicas armaduras salientes são armaduras de pré-esforço por pré-tensão existentes no banzo inferior, que apresentam um comprimento saliente de 25 cm, e são retas. Apenas metade das armaduras de pré-esforço existentes no banzo inferior de cada viga são salientes nos topos, e as armaduras que saem de uma viga estão desfasadas em relação aquelas que saem da outra, para dessa forma não haver conflitos durante a montagem.

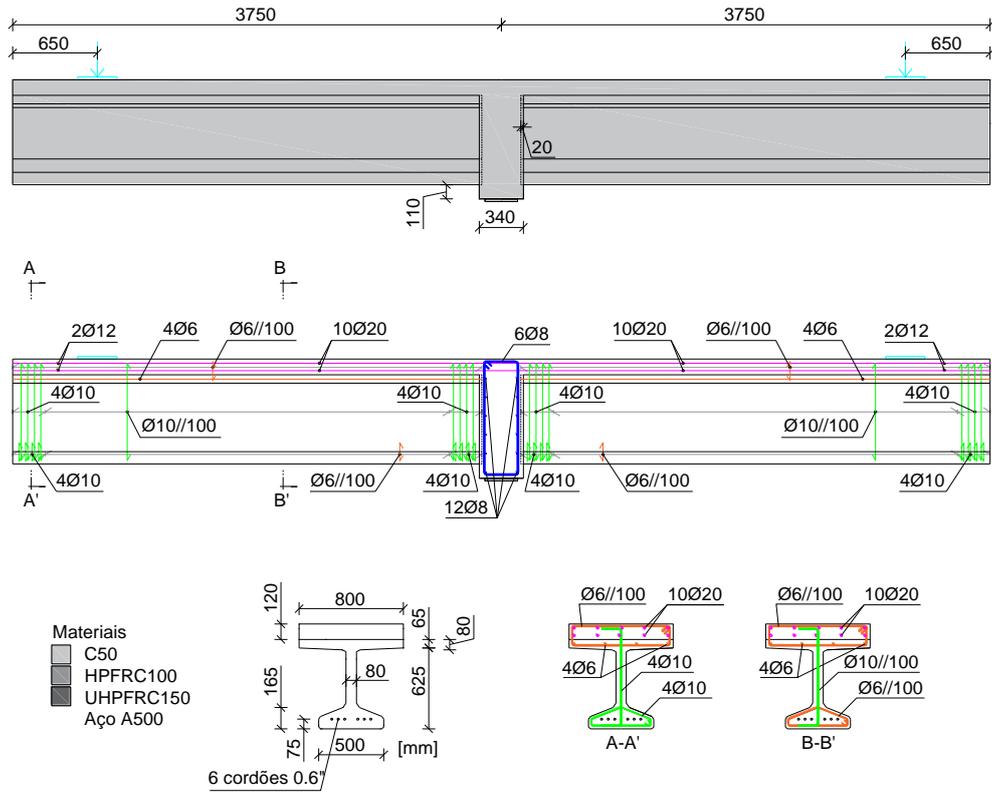


Figura 2. Modelo V1 – Vigas e laje em betão convencional C50.

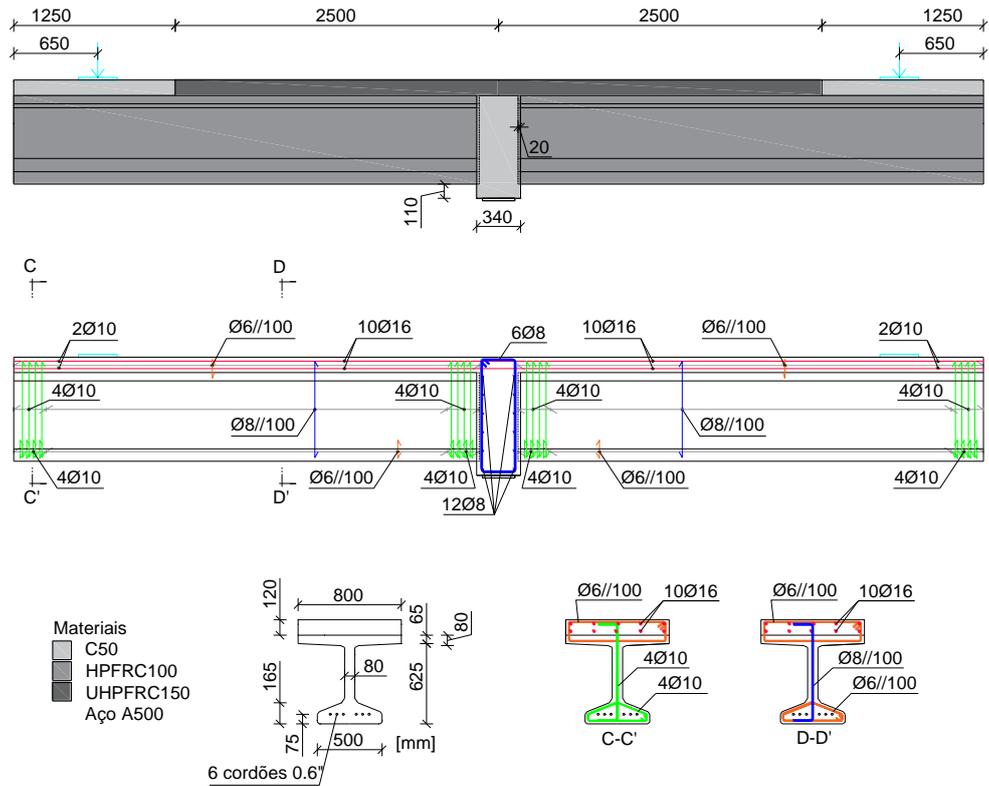


Figura 3. Modelo V2 – Vigas em HPFRC e laje em UHPFRC.

No modelo V1, a carlinga é betonada em simultâneo com a laje, com betão convencional. No modelo V2, há uma primeira betonagem em betão convencional, que abrange a carlinga e um segmento de laje mais distanciado da ligação de continuidade. Numa segunda fase, é feita a betonagem da laje, num troço com um comprimento de 5 m, centrado com a ligação.

Os modelos V1 e V2 foram dimensionados para que tenham resistência à flexão semelhante, e com taxas de armadura na laje similares às dimensionadas para o tabuleiro à escala real. Para além disso, foram utilizadas armaduras para resistir ao esforço transversal, corte na ligação da alma aos banzos e esforço longitudinal nas juntas de betonagem entre betões de diferentes idades, de forma a garantir que a rotura ocorre por flexão.

O sistema de carregamento e apoios utilizado nos ensaios está apresentado na Fig. 4. Como se pretende aplicar momentos fletores negativos na ligação, é utilizado um atuador que exerce força descendente junto a uma extremidade do modelo (do lado esquerdo, na figura). Na extremidade oposta, existe um sistema de ancoragem, que exercerá uma força descendente sobre o modelo idêntica à aplicada pelo atuador. O atuador é fixado, por intermédio de um pórtico metálico, à laje de reação, do laboratório, que equilibra as forças transmitidas ao modelo nas suas extremidades e a reação vertical na zona da carlinga.

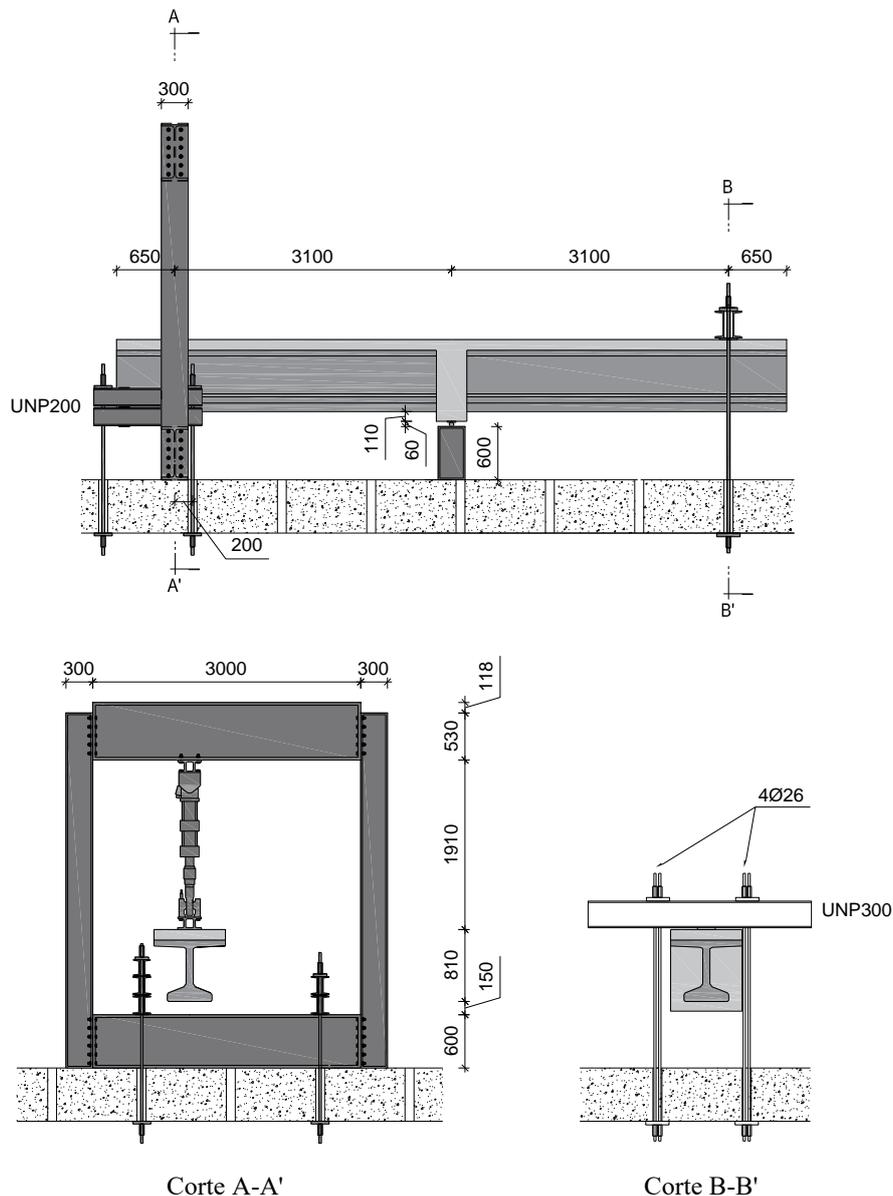


Figura 4. Setup dos ensaios (dimensões em mm).

Para monitorizar as deformações foram utilizados 14 transdutores de deslocamento do tipo LVDT, nas posições indicadas na Fig. 5. Os transdutores 1 e 14 são suportados por uma barra auxiliar em alumínio, encastrada na carlinga, medindo desta forma o deslocamento vertical nas secções transversais onde são aplicadas as forças. Os restantes transdutores medem a variação de comprimento (chamemos-lhe alongamento), ao longo de um comprimento de 500 mm. Oito deles monitorizam as deformações na laje, e os restantes 4 medem as deformações ao nível do banzo inferior de uma das vigas. Os resultados medidos por estes transdutores 2 a 13 podem ser usados para determinar a deformação média ao longo de cada um dos segmentos com 500 mm de comprimento.

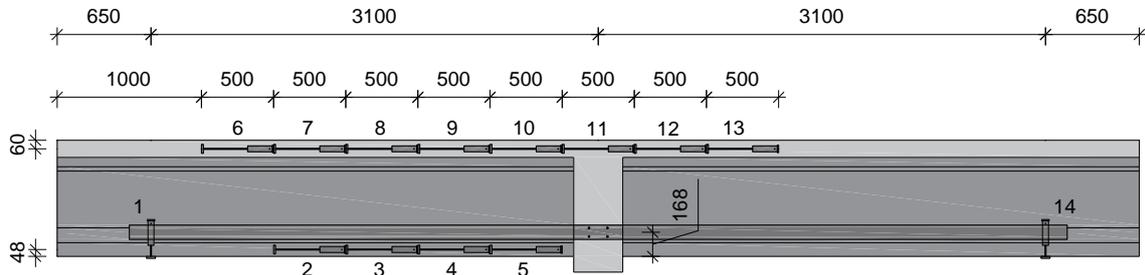


Figura 5. Transdutores de deslocamento usados nos ensaios (dimensões em mm).

### 3. JUSTIFICAÇÃO DO CARREGAMENTO CÍCLICO APLICADO

São aplicados dois níveis de carregamentos cíclicos. No primeiro carregamento cíclico, a carga aplicada varia sinusoidalmente, em ciclos de amplitude constante, entre um valor mínimo de 91 kN e um máximo de 139 kN. Foram aplicados 100 000 ciclos com estas características. Esta carga máxima aplicada no modelo foi definida de forma que gerasse, na armadura do modelo V1 (na secção de momento fletor máximo) a mesma tensão que foi calculada para a ponte do caso de estudo à escala real em combinação característica de ações. A amplitude de carga foi determinada também de forma a gerar no modelo uma amplitude de tensão na armadura (na mesma secção) igual à induzida na ponte pelo carregamento ferroviário em combinação frequente de ações. O critério que condicionou o dimensionamento da armadura na ponte foi a limitação da abertura de fendas a 0,30 mm em combinação frequente de ações.

Para determinar o segundo carregamento cíclico, os valores mínimo e máximo em cada ciclo foram determinados de forma a produzir tensões na armadura do modelo V1 iguais aquelas que ocorreriam no tabuleiro à escala real, em combinação característica de ações, caso a armadura tivesse sido dimensionada atendendo apenas à condição de resistência à flexão em estado limite último (ELU). Geraram-se desta forma níveis de tensão na armadura mais elevados, e maiores cargas aplicadas no modelo, variando então de 117 a 187 kN. Foram também aplicados 100 000 ciclos com estas características.

Uma vez que o modelo V2 foi dimensionado para ter uma resistência à flexão em ELU semelhante à do modelo V1, foram aplicados em ambos os modelos carregamentos cíclicos com as mesmas características.

Após a aplicação dos carregamentos cíclicos nos modelos, ambos serão levados à rotura, de forma a verificar a resistência à flexão dos modelos ensaiados.

### 4. RESULTADOS

As Figs. 6 e 7 apresentam o padrão de fissuração observado nos modelos V1 e V2, respetivamente. Apresentam-se as fissuras que surgiram após um carregamento inicial monotonicamente crescente de 100 kN (em verde), após os 100 primeiros ciclos com forças de 91 a 139 kN (em azul), após serem atingidos os 100 000 ciclos com essa amplitude (em amarelo), e após serem aplicados os primeiros ciclos

de carregamento com a amplitude mais alta (força a variar entre 117 e 187 kN). Depois, até ao final dos 100 000 ciclos de carregamento mais alto, não se observou a ocorrência de novas fissuras, e por esse motivo esse é o padrão de fissuração registado no final do carregamento cíclico ( $2 \times 10^5$  ciclos). Conclui-se que, no modelo V1, com ligação de continuidade em betão convencional e armaduras ordinárias, há um aumento notável da fissuração à medida que o carregamento aumenta, e quando foram aplicados os primeiros  $10^5$  ciclos. Neste modelo, na laje, há um número muito elevado de fissuras, que a atravessam, e com um reduzido espaçamento entre si. Pelo contrário, no modelo V2, com a laje em UHPFRC na zona da ligação, a fissuração é insípiente, não se observando qualquer fissura a atravessar completamente a laje. Observaram-se novas fissuras quando o carregamento foi aumentado, mas a repetição dos ciclos 100 000 vezes não produziu novas fissuras perceptíveis. As fissuras na laje são visíveis apenas muito próximo da carlinga, e nas regiões onde a laje foi realizada com betão convencional apenas.

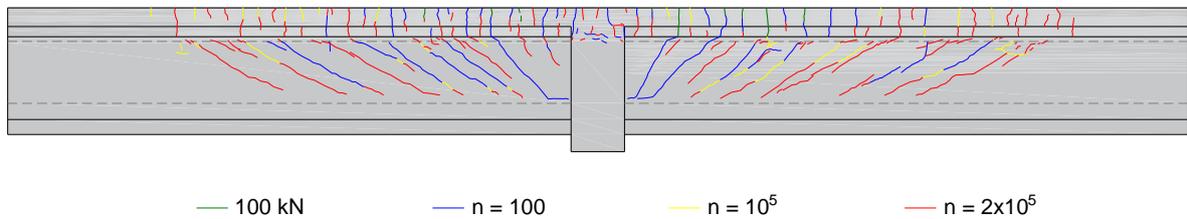


Figura 6. Padrão de fissuração do modelo V1.

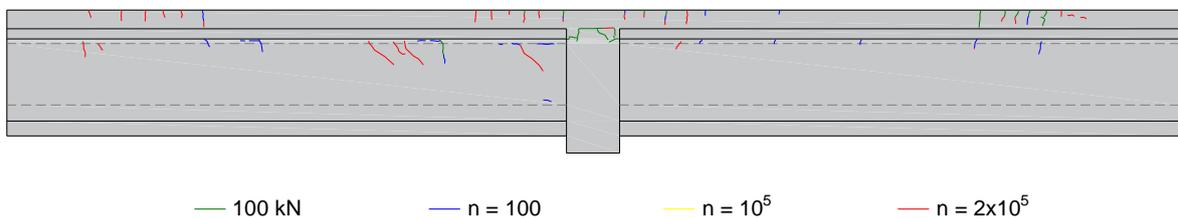


Figura 7. Padrão de fissuração do modelo V2.

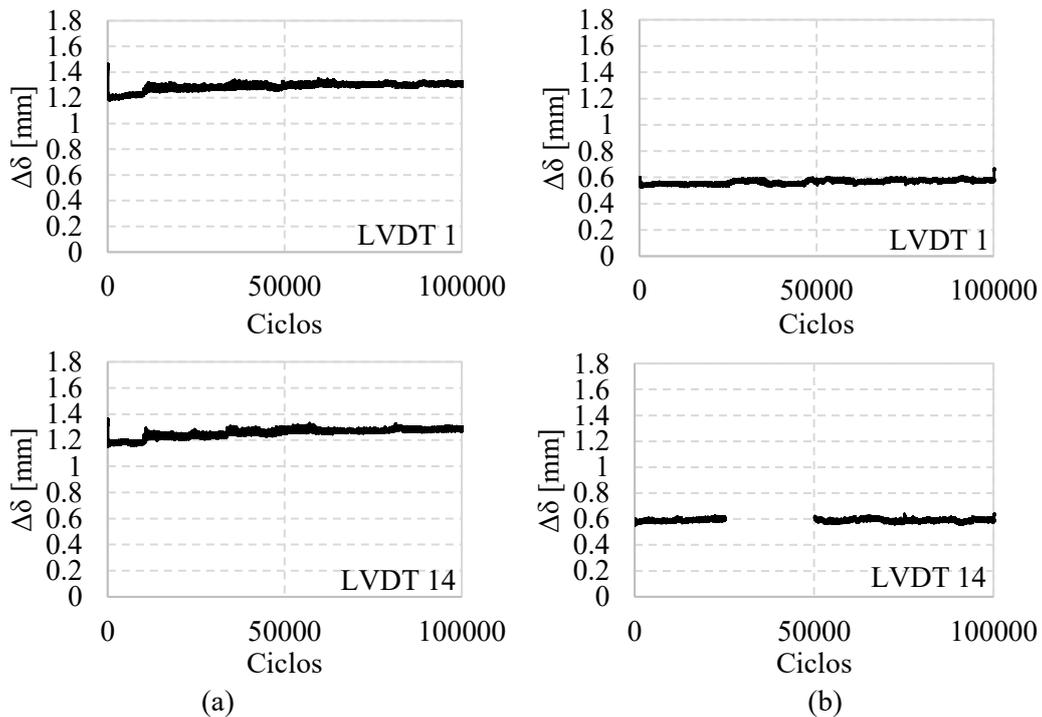


Figura 8. Amplitude de deslocamento vertical medido nos LVDT 1 e 14, ao longo dos primeiros 100 000 ciclos: (a) V1; (b) V2.

A Fig. 8 mostra como variou a amplitude do deslocamento vertical, em cada um dos modelos (V1 à esquerda, V2 à direita), ao longo dos primeiros 100 000 ciclos. A amplitude  $\Delta\delta$  apresentada corresponde à diferença entre o valor máximo e o valor mínimo medido em cada ciclo. E a Fig. 9 apresenta a amplitude medida pelo LVDT no banzo inferior que se encontra mais próximo da ligação de continuidade, e nos três LVDT nas posições centrais da laje, também para os modelos V1 e V2.

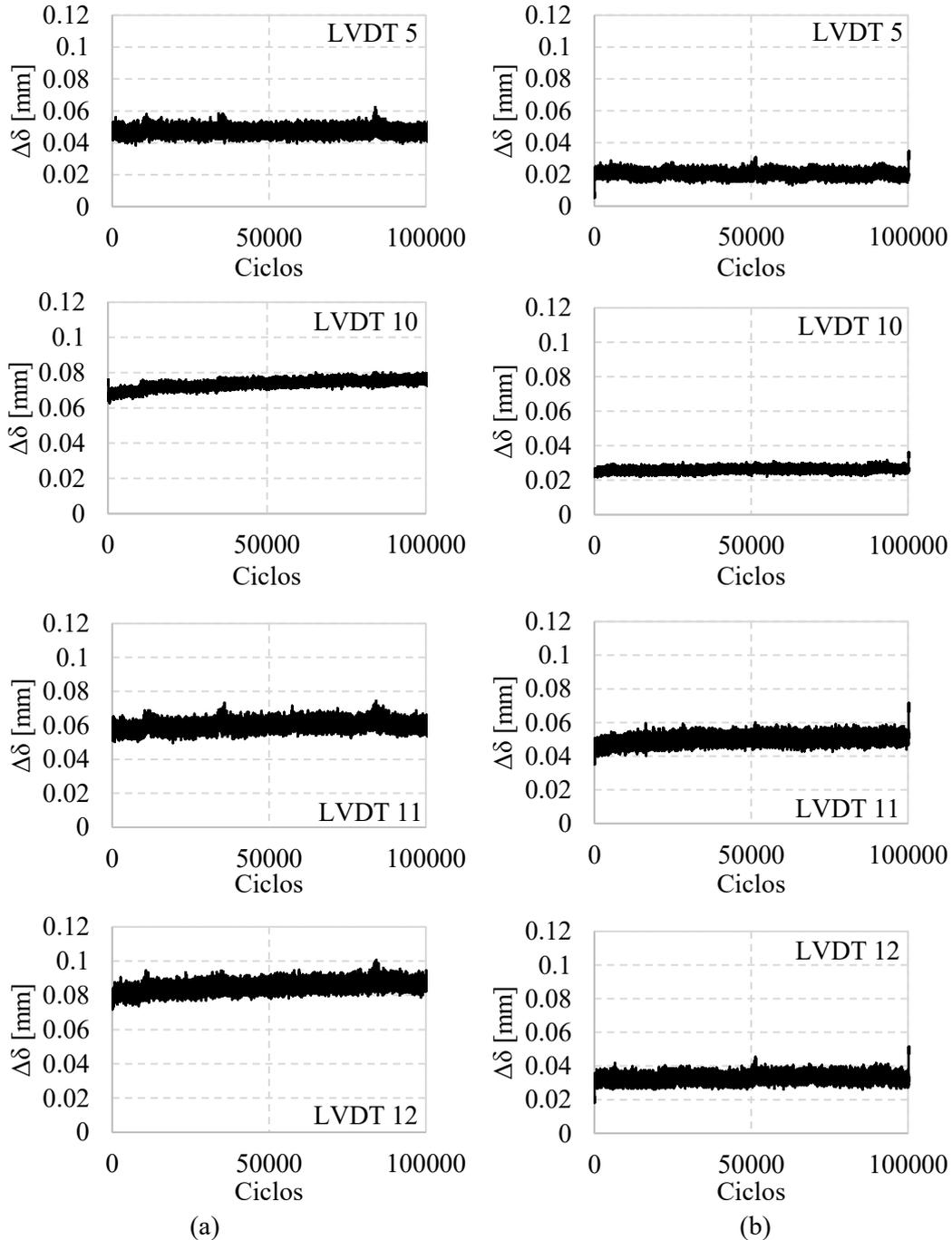


Figura 9. Amplitude da deformação medida nos LVDT 5, 10, 11 e 12, respetivamente, ao longo dos primeiros 100 000 ciclos do modelo: (a) V1; (b) V2.

Observa-se, na Fig. 9, um ligeiro aumento da amplitude de deslocamento ao longo dos 100 000 ciclos, por existir alguma degradação da rigidez da estrutura causada pela repetição dos ciclos. O aspeto principal a destacar é a diferença entre o comportamento das duas soluções estudadas. A amplitude de deslocamento vertical no modelo com ligação em UHPFRC (Fig. 8b) é menos de metade da amplitude

medida no modelo com ligação convencional (Fig. 8a). As amplitudes medidas pelos transdutores que registam a deformação dos banzos no modelo V2 são também, em geral, menos de metade das registadas no modelo V1. A exceção é o LVDT 11, que monitoriza a zona central da laje, onde o modelo V2 apresenta uma amplitude de deformação pouco inferior à medida no modelo V1. Isto deveu-se à concentração da fissuração, no modelo V2, na zona de extremidade dos segmentos de viga pré-fabricada que se unem à carlinga.

Foram realizados inicialmente 100 ciclos a uma frequência de 0,05 Hz, seguidos de 99 800 ciclos a uma frequência de 1 Hz, e mais 100 ciclos com frequência de 0,05 Hz, todos com forças a variar de 91 a 139 kN. Recorreu-se aos ciclos com uma menor frequência para neles caracterizar com mais detalhe as deformações. Nas Figuras 10 e 11 são apresentados os gráficos do alongamento máximo e mínimo medido pelos LVDT 6 a 13, no início e no fim de cada um dos grupos de 100 ciclos. Os resultados apresentados nessas figuras, para cada um dos transdutores, são o alongamento máximo e mínimo registado durante o ciclo. Antes da aplicação de cada um desses grupos de 100 ciclos, foi feita a descarga completa da força aplicada à estrutura, e foi realizada a zeragem dos valores medidos pelos LVDT (apresentados nas Figs. 10 a 13). Portanto, os resultados apresentados nestas figuras não incluem as deformações residuais que existiam antes de voltar a carregar a viga. Observa-se que o alongamento máximo medido nos primeiros 100 ciclos no modelo V1 foi de aproximadamente 0,33 mm e no modelo V2 foi de menos da metade, com um valor máximo de aproximadamente 0,14 mm. Nos últimos 100 ciclos o alongamento máximo medido no modelo V2 também foi praticamente metade do modelo V1, com valores máximos de aproximadamente 0,14 e 0,28 mm, respetivamente.

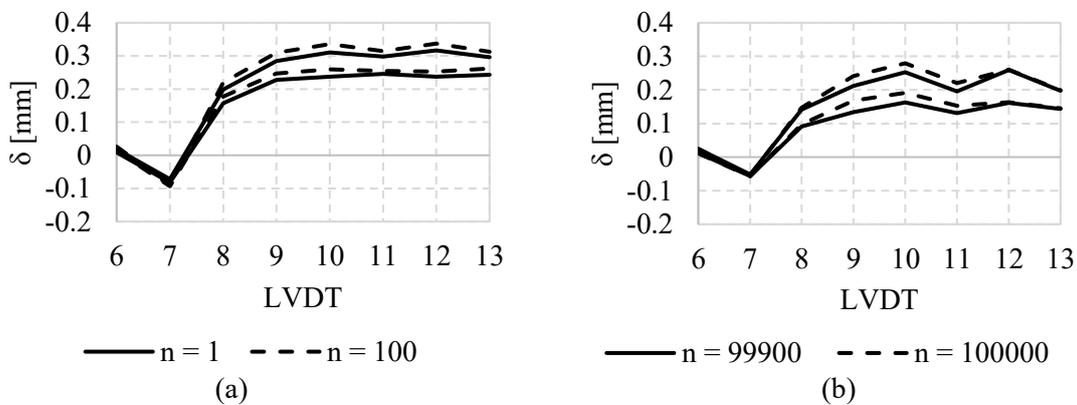


Figura 10. Limites inferior e superior do alongamento medido por cada um dos LVDT 6 a 13, no modelo V1, em ciclos com força a variar entre 91 e 139 kN: (a) primeiros 100 ciclos com esta amplitude; (b) últimos 100 ciclos com esta amplitude.

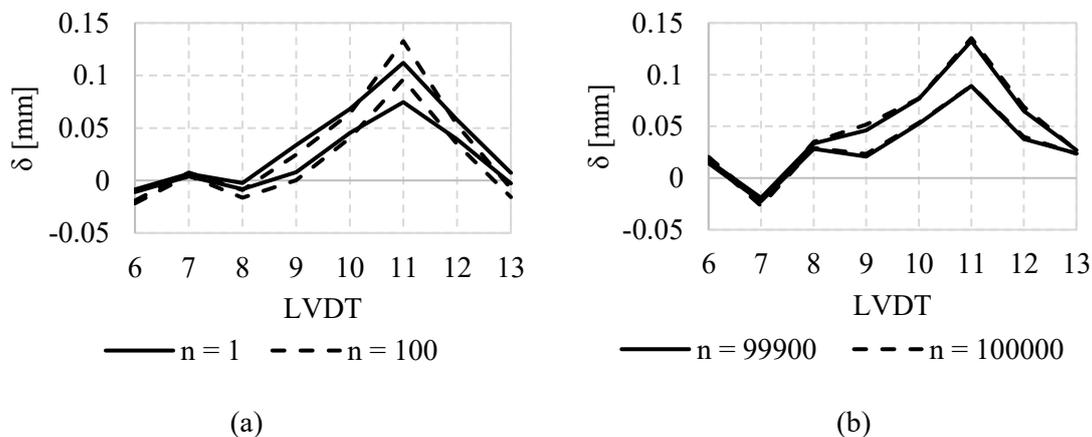


Figura 11. Limites inferior e superior do alongamento medido por cada um dos LVDT 6 a 13, no modelo V2, em ciclos com força a variar entre 91 e 139 kN: (a) primeiros 100 ciclos com esta amplitude; (b) últimos 100 ciclos com esta amplitude.

Além disso, comparando os resultados nos modelos V1 e V2, observa-se que, na ligação com HPFRC, as deformações decrescem muito rapidamente com a distância ao eixo do apoio, enquanto na ligação em betão convencional o alongamento registado pelos LVDT 9 a 13 é praticamente igual. Recorde-se que estes transdutores monitorizam o comportamento da laje ao longo de um comprimento de 2,50 m, que é mais do triplo da altura útil da secção transversal da viga.

Posteriormente, foram realizados novos ensaios, com os mesmos números de ciclos, as mesmas frequências de carregamento, só que com forças a variar de 117 a 187 kN. Os gráficos do alongamento máximo e mínimo medido pelos LVDT 6 a 13, no início e no fim de cada um dos 100 ciclos, podem ser observados nas Figuras 12 e 13. Nos últimos 100 ciclos, o alongamento máximo obtido no modelo V1 foi de 0,38 mm, enquanto no modelo V2 foi de 0,28 mm. Também nestes ciclos é notória a diferença de comportamento entre os modelos V1 e V2 no que se refere à rápida redução de deformações, na ligação com HPFRC, com a distância à carlinga de continuidade entre tramos.

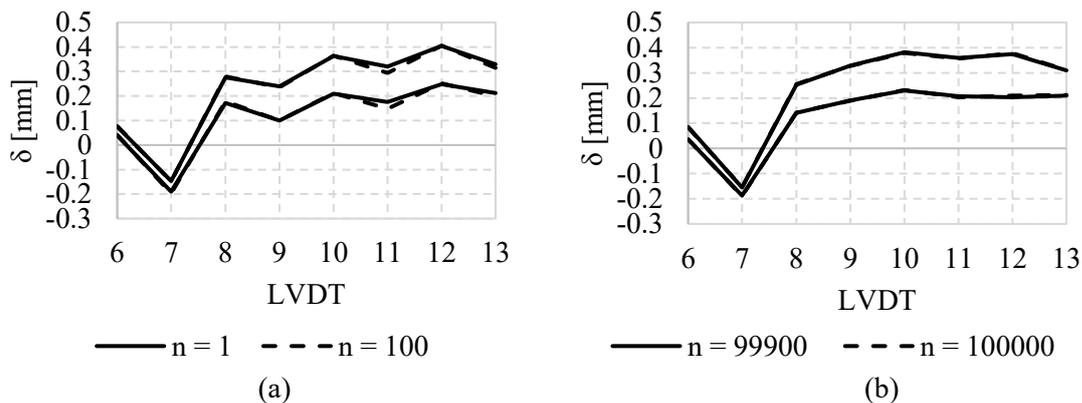


Figura 12. Limites inferior e superior do alongamento medido por cada um dos LVDT 6 a 13, no modelo V1, em ciclos com força a variar entre 117 e 187 kN: (a) primeiros 100 ciclos com esta amplitude; (b) últimos 100 ciclos com esta amplitude.

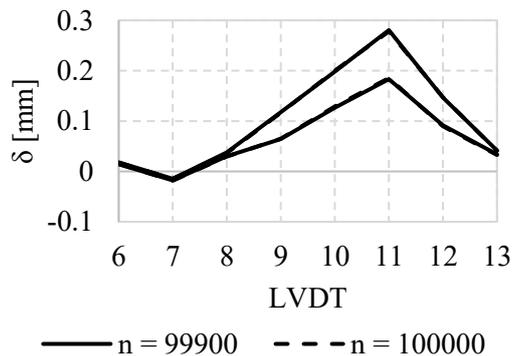


Figura 13. Limites inferior e superior do alongamento medido por cada um dos LVDT 6 a 13, no modelo V2, em ciclos com força a variar entre 117 e 187 kN: (a) primeiros 100 ciclos com esta amplitude; (b) últimos 100 ciclos com esta amplitude.

## CONCLUSÕES

Neste artigo são apresentados os resultados de ensaios laboratoriais, cíclicos, em modelos à escala reduzida, de vigas contínuas pré-fabricadas de tabuleiros ferroviários de alta velocidade. É possível verificar a degradação da rigidez da estrutura, através do aumento da amplitude dos deslocamentos sob o mesmo nível de carregamento, que é mais pronunciada no modelo V1 (ligação não pré-esforçada, em betão convencional). Para além disso, quantificou-se a variação da amplitude dos deslocamentos entre os dois modelos ensaiados. O modelo em betão convencional apresentou praticamente o dobro da

amplitude de deslocamento vertical comparativamente ao modelo com ligação em UHPFRC (V2). No modelo V1, esta amplitude varia de aproximadamente 1,2 a 1,4 mm nos LVDT 1 e 14, enquanto no modelo V2 a amplitude fica próximo de 0,6 mm. As amplitudes dos alongamentos medidos na laje, no modelo V1, também são praticamente o dobro das medidas no modelo V2.

Em relação aos alongamentos medidos nos LVDT da laje, antes e após o carregamento cíclico mais baixo, também foi possível observar no modelo V1 valores máximos de praticamente o dobro do modelo V2. Essa diferença entre o modelo V1 e o modelo V2 reduziu quando foram comparados os alongamentos medidos antes e após o carregamento cíclico mais alto, com valores máximos de 0,38 e 0,28 para o modelo V1 e V2, respetivamente.

Foi possível caracterizar as diferenças entre o padrão de fissuração na ligação convencional e na ligação que recorre a HPFRC, assim como a rápida redução da deformação medida na laje, na ligação com HPFRC, à medida que aumenta a distância à carlinga.

Os resultados experimentais obtidos constituem uma base de dados relevante para a calibração de modelos de cálculo do comportamento em serviço de ligações de continuidade entre vigas pré-fabricadas.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e DOI 10.54499/UIDB/04708/2020 (<https://doi.org/10.54499/UIDB/04708/2020>) da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

O trabalho foi realizado no âmbito do projeto iPBRail - Innovative Precast Bridges for RAILways, com referência POCI-01-0247-FEDER-039894, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) e do Programa Operacional Regional de Lisboa (LISBOA 2020), ao abrigo do Portugal 2020.

O apoio financeiro da Fundação Portuguesa para a Ciência e a Tecnologia, I.P. (FCT) e do Fundo Social Europeu (FSE), através das bolsas de doutoramento 2023.03238.BD e PD/BD/143147/2019, atribuídas aos primeiros autores, também é agradecido.

## **REFERÊNCIAS**

- [1] Corrêa, L.; Sousa, C.; Pimentel, M.; Valente, R.; Pinto, J.R. (2022). Estudo de viabilidade de solução de continuidade para pontes ferroviárias pré-fabricadas com vãos até 30 m. *Atas das 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2022 – 12º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. LNEC, Lisboa.
- [2] Corrêa, L.; Sousa, C.; Pimentel, M.; Valente, R.; Pinto, J.R. (2022). Estudo de viabilidade de utilização de HPFRC em vigas pré-fabricadas para pontes ferroviárias com vãos até 30m. *Atas das 6as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Encontro Nacional de Betão Estrutural 2022 – 12º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. LNEC, Lisboa.
- [3] Valente, R.; Pimentel, M.; Sousa, C.; Pinto, J.R. (2023). Precast Bridge Deck for Railway Using HPFRC and UHPFRC. In: Ilki, A., Çavunt, D., Çavunt, Y.S. (eds) *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient*. fib Symposium 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 350. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3\\_180](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_180)