

## **Comportamento à flexão até à rotura de ligação de continuidade inovadora para pontes pré-fabricadas**

**R. Valente**<sup>1</sup>

**L. Corrêa**<sup>2</sup>

**M. Pimentel**<sup>3</sup>

**C. Sousa**<sup>4</sup>

### **RESUMO**

Este trabalho de investigação apresenta os resultados de uma campanha experimental que visa o estudo de um novo conceito para pontes pré-fabricadas ferroviária. A solução que se propõe consiste em vigas pré-fabricadas de betão de elevado desempenho reforçado com fibras (HPFRC). A continuidade entre vãos adjacentes é materializada com recurso a uma laje em compósito cimentício de ultra-elevado desempenho reforçado com fibras (UHPFRC). A principal questão abordada é o comportamento à flexão na região de continuidade. O comportamento da ligação inovadora é avaliado através de testes de flexão. Uma solução convencional em betão armado (BA) é também testada em condições idênticas para que os resultados sejam usados como referência de comparação. Os resultados são discutidos com recurso a metodologias de cálculo desenvolvidas e que traduzem as contribuições das fibras para a resistência à flexão.

Os resultados da campanha de testes à flexão das soluções inovadora e convencional mostram que a solução de laje UHPFRC armada (R-UHPFRC) oferece maior rigidez de flexão, resultando em menores curvaturas e flechas. Porém, o UHPFRC induz localização de deformações no momento da cedência das armaduras longitudinais da laje, conduzindo a uma redução significativa da ductilidade que poderia ser explorada para a redistribuição de momentos fletores. As metodologias de cálculo reproduzem satisfatoriamente a carga de rotura e a deformação última.

**Palavras-chave:** Continuidade; Campanha experimental, UHPFRC; Rotura de flexão, Pré-fabricação.

### **1. INTRODUÇÃO**

O tráfego ferroviário está a aumentar em termos de volume, carga e velocidades de circulação à medida que as sociedades procuram opções de transporte com menor impacto ambiental. As pontes são pontos críticos das redes ferroviárias e requerem especial atenção considerando o envelhecimento das infraestruturas e as crescentes exigências a que estão sujeitas. Como resultado, poderá ser necessário o reforço, a reabilitação ou, em alguns casos, a substituição completa da infraestrutura existente. Contudo, os custos diretos resultantes da manutenção, combinados com os custos indiretos resultantes de interrupções de serviço, estão a tornar-se um encargo financeiro significativo para a sociedade. Portanto, as futuras infraestruturas sustentáveis serão aquelas que necessitarão de menos manutenção.

---

<sup>1</sup> CONSTRUCT-LABEST, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, [up201206018@edu.fe.up.pt](mailto:up201206018@edu.fe.up.pt)

<sup>2</sup> CONSTRUCT-LABEST, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, [up201800082@edu.fe.up.pt](mailto:up201800082@edu.fe.up.pt)

<sup>3</sup> CONSTRUCT-LABEST, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, [mjisp@reit.up.pt](mailto:mjisp@reit.up.pt)

<sup>4</sup> CONSTRUCT-LABEST, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, [cfsousa@fe.up.pt](mailto:cfsousa@fe.up.pt)

Para enfrentar estes desafios, vale a pena explorar os avanços recentes na área dos compósitos cimentícios para aplicações estruturais. O betão de elevado desempenho reforçado com fibras metálicas (HPFRC) e os compósitos de ultra-elevado desempenho reforçados com fibras metálicas (UHPFRC) podem abrir uma nova gama de soluções estruturais com durabilidade excepcional e que pode maximizar o tempo de vida da infraestrutura, conduzindo assim à redução de custos de manutenção.

No entanto, a aplicação destes materiais no dimensionamento estrutural enfrenta desafios importantes, apesar das potencialidades oferecidas. A variabilidade associada ao volume e orientação das fibras metálicas dificulta a caracterização das propriedades mecânicas de tração. Além disso, a interação entre as fibras e as armaduras no comportamento à tração acrescenta complexidade ao problema. A falta de cobertura regulamentar de metodologias de dimensionamento como aquelas existentes para betão armado, bem como a limitada familiaridade dos engenheiros e empreiteiros com o HPFRC e o UHPFRC, dissuade a adoção generalizada destes materiais.

Os sistemas estruturais contínuos são frequentemente adotados em pontes por geralmente conduzirem a soluções estruturais otimizadas, especialmente em pontes ferroviárias de alta velocidade, onde são essenciais para garantir um comportamento dinâmico adequado. A ligação longitudinal contínua entre vãos adjacentes na zona dos apoios intermédios requer frequentemente pós-tensão para evitar a formação de fissuras, preservar a rigidez de flexão e, no caso de vãos maiores, viabilizar a verificação de segurança em flexão aos estados limites últimos. No entanto, a pós-tensão requer equipamentos e mão-de-obra especializados e introduz complexidade adicional ao processo de construção, refletindo-se no aumento do tempo e dos custos de construção. O UHPFRC tem um comportamento à tração que pode potencialmente eliminar a necessidade de pós-tensão. Ao exibir resistências de fissuração e pós-fissuração elevadas, o UHPFRC pode melhorar a rigidez e a resistência da ligação, garantindo ao mesmo tempo aberturas de fendas mínimas. Portanto, as ligações contínuas com o UHPFRC podem levar a um processo de construção simplificado, à redução do tempo de construção e possivelmente diminuindo os custos.

A campanha experimental descrita neste trabalho visa validar a solução proposta para a zona de ligação inovadora em R-UHPFRC, comparando-a com a solução convencional em betão armado (BA). Espera-se também que os resultados experimentais possam ser utilizados para validar os modelos de cálculo para o comportamento à tração do UHPFRC com armadura convencional (R-UHPFRC).

## 2. MATERIAIS

Os protótipos utilizados na campanha experimental foram produzidos numa fábrica de pré-fabricação de betão da Mota-Engil em Nelas, especializada na produção de elementos para pontes e edifícios. Foi utilizado um betão autocompactável de classe de resistência C50 para produzir o protótipo da ligação em betão armado. Para o protótipo de ligação inovadora, foram utilizados HPFRC nas vigas e UHPFRC num troço da laje sobre o apoio. A composição de HPFRC foi previamente desenvolvida na unidade de investigação dos autores [1, 2]. O material foi concebido para cumprir a classe de resistência C100, sendo reforçado com 1% de fibras (0.5% de fibras retas com  $l_f = 13$  mm,  $d_f = 0.2$  mm,  $f_{s,f} = 2750$  MPa, e 0.5% de fibras com gancho duplo Dramix® Fibras 5D com  $l_f = 60$  mm,  $d_f = 0.90$  mm,  $f_{s,f} = 2300$  MPa). Foi obtida uma classe de desempenho de tração de  $\delta.d$  conforme comprovam os resultados de caracterização que podem ser consultados na referência [3].

Para a produção do UHPFRC, foi utilizada uma mistura comercial denominada de Ductal®. Foram utilizadas fibras metálicas com comprimento  $l_f = 15$  mm e diâmetro  $d_f = 0.2$  mm totalizando uma dosagem de 2.5% em volume. Foi obtido um valor de resistência à compressão de 167 MPa aos 28 dias de idade. O comportamento de tração do UHPFRC é caracterizado através de testes de tração uniaxial em provetes do tipo *dog-bone*. A deformação foi registada utilizando quatro LVDTs instalados em cada superfície lateral dos provetes. O comprimento de medição é de 92 mm e as dimensões da secção transversal na região de medição são de  $30 \times 40 \text{ mm}^2$ . A deformação média dos quatro LVDTs foi considerada representativa da deformação uniaxial de cada provete. A Figura 1 (a) mostra as curvas

tensão-deformação para as 6 amostras testadas. Resultados equivalentes são fornecidos na Figura 1 (b) em termos de deformação longitudinal média.

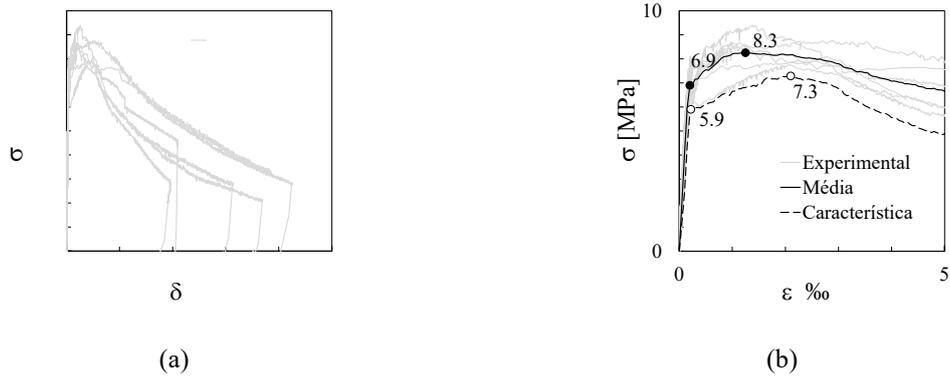


Figura 1. Curvas tensão-deformação média e característica para o UHPFRC.

As armaduras utilizadas nos ensaios pertencem à classe A500 NR. Os cordões de pré-esforço são da classe Y1860S7-15.7-F1-C1 [4] com diâmetro nominal de  $0.6'' = 15.7$  mm, área de secção transversal de  $1.50$  cm<sup>2</sup> e valor característico da tensão proporcional convencional  $f_{p0.1k} = 1640$  MPa.

### 3. PROTÓTIPOS, ARRANJO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

Esta campanha experimental tem como objetivo compreender e validar soluções de continuidade para tabuleiros de pontes pré-fabricados utilizando secções híbridas com compósitos cimentícios reforçados com fibras metálicas. Para servir como referência, é também testada uma solução de continuidade convencional em betão armado (BA). A geometria é mantida constante em ambos os testes e os protótipos são concebidos para ter resistências de flexão tentativamente iguais. O protótipo C-F-1 utiliza vigas e lajes em BA (Figura 2 (a)), enquanto o protótipo C-F-2 utiliza vigas em HPFRC e uma laje de continuidade em R-UHPFRC (Figura 2 (b)). Os protótipos C-F-1 e C-F-2 foram concebidos para que a rotura fosse governada pela resistência à flexão. Portanto, foram dimensionadas armaduras de corte para as almas e banzos por forma a evitar outros modos de rotura que não o de flexão.

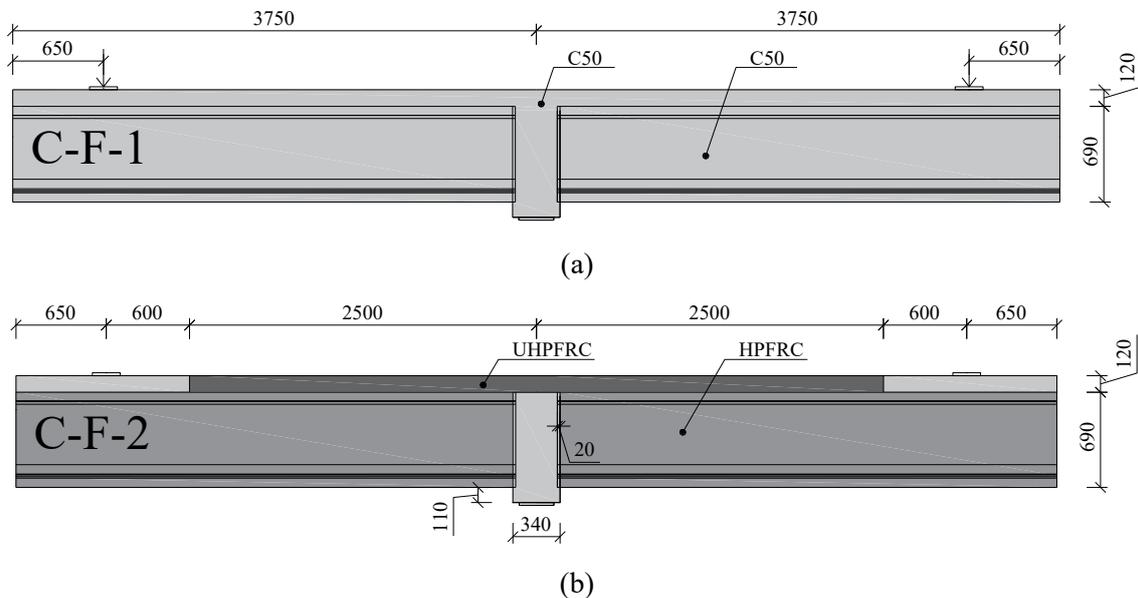


Figura 2. Protótipo com solução de continuidade em BA (C-F-1) e R-UHPFRC (C-F-2).

O protótipo C-F-1 utiliza vigas de betão de classe C50 e a laje, também em betão de classe C50, foi dimensionada com uma taxa de armadura longitudinal de  $\rho_s = 3.3\%$ . O protótipo C-F-2 utiliza uma laje em UHPFRC armada que requer uma taxa de armadura longitudinal menor ( $\rho_s = 2.1\%$ ) para se obter a mesma resistência de flexão, uma vez que parte da carga é transferida pelas fibras metálicas.

No final da 1ª fase de betonagem das vigas foram espalhados agregados na superfície superior das vigas enquanto o betão estava ainda no estado fresco, para conferir rugosidade à interface horizontal entre os betões de idades diferentes das vigas e da laje que seria betonada na fase seguinte. Adicionalmente, já com o betão das vigas no estado sólido, foi realizado um tratamento adicional para aumentar a rugosidade dessa mesma interface com recurso a um martelo pneumático. O mesmo procedimento foi aplicado aos topos das vigas que viriam a estar em contacto com o betão do diafragma. A superfície de betão do banzo superior das vigas é previamente saturada, sem água livre aparente, antes das lajes serem betonadas numa 2ª fase de betonagem. A Figura 3 (a) mostra a 2ª fase de betonagem do protótipo C-F-1. No caso do protótipo C-F-2 com a ligação em R-UHPFRC, apenas uma parte da laje foi betonada com betão convencional durante a 2ª fase. Neste caso, uma 3ª fase de betonagem foi conduzida para o segmento de laje UHPFRC, como se mostra na Figura 3 (b).



Figura 3. 2ª fase de betonagem (C-F-1) e 3ª fase de betonagem (C-F-2)

O arranjo experimental para ensaiar as vigas está representado na Figura 4. O protótipo está simplesmente apoiado sob o diafragma permitindo deslocamentos e rotações na direção longitudinal. A carga é aplicada num dos lados do protótipo utilizando um atuador vertical fixo a um pórtico que, por sua vez, está ancorado à laje de reação. Uma rótula é posicionada ao longo da linha de ação do atuador para acomodar as deformações do protótipo e do próprio pórtico, garantindo que a carga transmitida se alinha com o atuador. A força aplicada pelo atuador no protótipo é medida pela célula de carga posicionada entre o pistão e a rótula. Internamente, o atuador mede os deslocamentos de pistão que são utilizados para o controlo da atuação. Na outra extremidade do protótipo, existe uma ancoragem que, devido à simetria do esquema estrutural, aplica a mesma carga que aquela aplicada pelo atuador ao protótipo. Portanto, a região de continuidade é submetida a um diagrama de momentos flectores triangular simétrico.

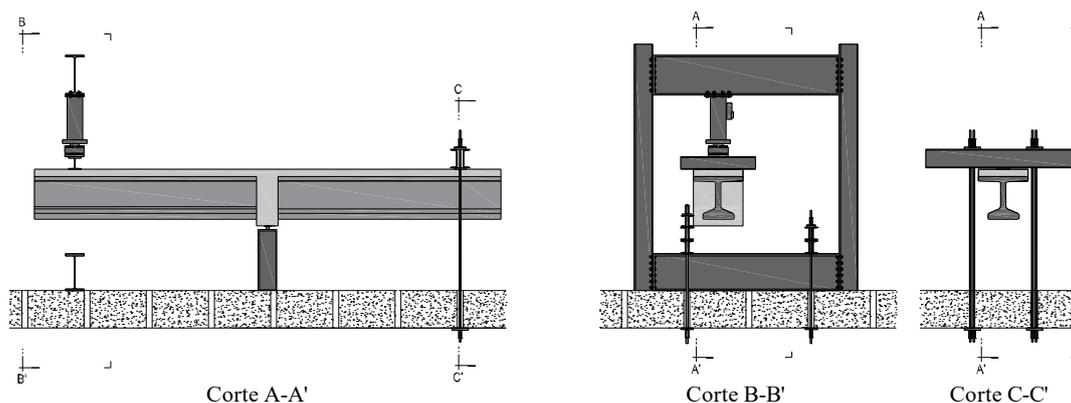


Figura 4. Arranjo experimental

O esquema e a identificação dos LVDTs estão representados na Figura 5. O objetivo dos LVDTs verticais é medir flechas em ambos os lados do protótipo a 3.1 m de distância do apoio central e alinhadas com as forças aplicadas. Para isso, os LVDTs são fixados num perfil metálico, enquanto os alvos estão ligados à face inferior das vigas. O perfil metálico, por sua vez, é fixado no diafragma do protótipo. Desta forma é possível fazer medições com uma referência interna e eliminar a componente de rotação do corpo rígido do protótipo e obter diretamente as flechas relativamente ao apoio. Os LVDTs horizontais nos banzos são posicionados de forma adjacente e são utilizados para determinar deformações médias ao longo do seus comprimentos de medição.

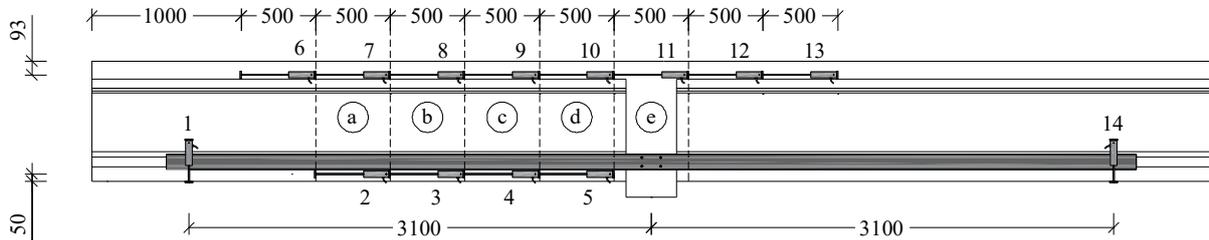


Figura 5. Esquema de instrumentação para medição de deslocamentos [mm]

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 C-F-1

O protótipo C-F-1 entrou em cedência com formação de uma rótula plástica na secção de interface com o diafragma. Ocorreu esmagamento do betão no banzo comprimido já em fase de cedência das armaduras de flexão. A Figura 6 mostra o padrão de fendilhação no final do teste de carregamento do protótipo C-F-1. As fendas de flexão surgem no topo da laje e propagam-se gradualmente em direção à alma. As fendas começam a formar-se perto do apoio central e vão se formando progressivamente em direção ao ponto de aplicação da carga. As fendas propagam-se verticalmente no banzo superior, mas, à medida que propagam para a região da alma, tornam-se inclinadas. A inclinação das fendas ao longo do vão é praticamente constante, mas perto do apoio são menos inclinadas, resultante do equilíbrio entre o campo de compressões e a reação do apoio vertical sob o diafragma.

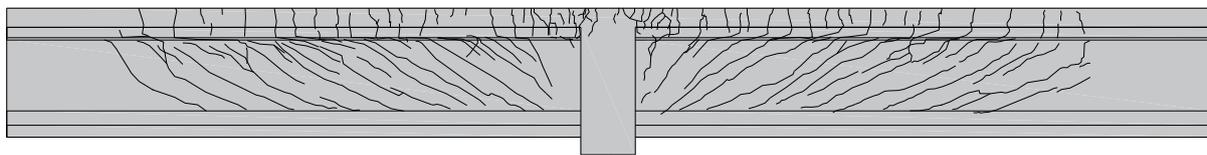


Figura 6. C-F-1 – Padrão de fendilhas no final do teste experimental

A Figura 7 mostra os resultados do teste em termos de deformações ao longo do carregamento. Os resultados do LVDT 5 não puderam ser obtidos. Era esperado que ambos os LVDTs verticais 1 e 14 fornecessem flechas idênticas, como foi confirmado durante o teste. No entanto, comparando as flechas em ambos os lados da zona de ligação (a), um dos lados do protótipo mostrou ser ligeiramente mais flexível ao longo do teste, antecipando a formação de uma rótula plástica nesse mesmo lado da viga. A rótula plástica é evidenciada pelo rápido crescimento das deformações no banzo superior perto do diafragma (b) para um ligeiro aumento da carga. É provável que a cedência tenha começado na zona de diafragma para carga de corte entre 405 kN e 415 kN. Pode ser também observado o crescimento da região plastificada com o aumento da carga. O teste foi interrompido para uma carga aplicada de 450 kN para a qual a região em regime plástico se propagou até aproximadamente 1.5 m do apoio.

Adicionalmente, as curvaturas médias são estimadas com base nas deformações longitudinais médias medidas nos banzos. Devido à falta de dados relacionados com a deformação medida pelo LVDT 5, a curva de deformação longitudinal média é representada com base no pressuposto da

deformação de compressão nula. O mesmo procedimento é usado para a aquisição de dados dos LVDTs que medem a deformação de compressão longitudinal na região do diafragma.

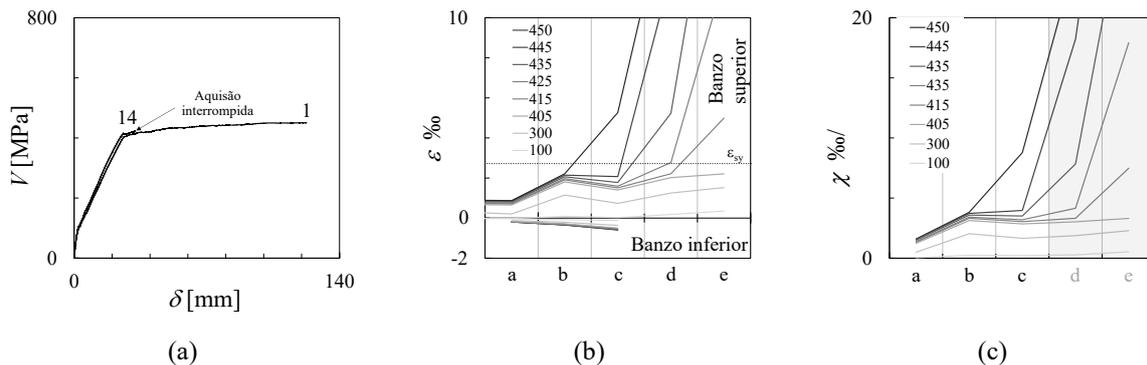


Figura 7. C-F-1 – Resultados: (a) flechas, (b) deformações longitudinais dos banzos e (c) curvaturas.

#### 4.2 C-F-2

O protótipo C-F-2 também exibiu rotura de flexão mas com a localização das deformações numa fissura crítica, governada pela resposta à tração da laje R-UHPFRC junto do apoio central. A Figura 8 mostra o padrão de fendilhação que pode ser detetado visualmente no final do ensaio. A secção que governou a rotura foi a mesma que se observou no teste do protótipo C-F-1, na interface entre a viga e o diafragma. A utilização de uma laje armada com UHPFRC resultou num menor número de fendas detetáveis. Quase nenhuma fenda pode ser observada na laje UHPFRC junto à zona de carregamento, mas podem ser detetadas algumas fendas na laje de RC, onde os momentos de flexão são mais baixos. Isto destaca a maior resistência à fissuração do UHPFRC, reduzindo a extensão de fissuração e melhorando a rigidez global da ligação.

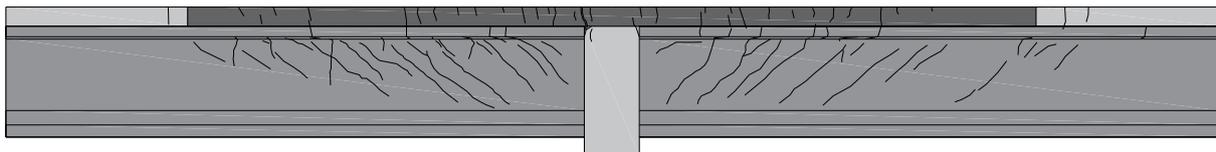


Figura 8. C-F-2 – Padrão de fendas no final do teste experimental

A Figura 9 mostra os resultados do teste em termos de deformações obtidas ao longo do carregamento. Os resultados dos LVDTs 4 e 5 não puderam ser obtidos. As flechas em ambos os lados da zona de continuidade são idênticas, como esperado, até ao pico de carga ser atingido (a). À medida que o deslocamento imposto aumenta, a força começou a diminuir com o aumento da flecha apenas num dos lados do protótipo, onde ocorreu a localização, enquanto o outro lado ocorre descarga com diminuição da flecha. A perda de rigidez antes da localização deve-se à cedência das armaduras longitudinais da laje (b) perto do diafragma. A rápida diminuição da contribuição das fibras na fase pós pico provoca a localização das curvaturas na região crítica (c) e a aumentar com a diminuição da carga, as outras zonas descarregam com diminuição das deformações, ainda que a resposta de descarga seja muito rígida, como pode ser compreendido a partir das pequenas variações de deformação na fase pós-pico.

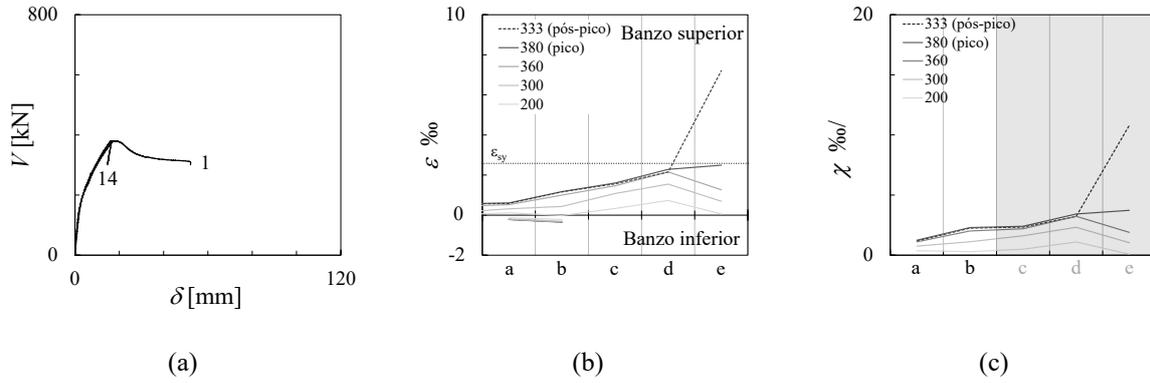


Figura 9.C-F-2 – Resultados: (a) flechas, (b) deformações longitudinais dos banzos e (c) curvaturas.

### 4.3 Comparação

A Figura 10 (a) compara as soluções de continuidade em termos de curvas de carga-deformação. O protótipo C-F-2 mostrou uma resistência de flexão ligeiramente inferior, embora os protótipos tenham sido concebidos para resistir à mesma carga. Isto é explicado pela ligeira sobrestimação da resistência pós-fissuração do UHPFRC assumida durante o dimensionamento das armaduras longitudinais da ligação. Na rotura, o impacto da utilização de uma solução de R-UHPFRC na capacidade de deformação é significativo. Como já foi explicado, a capacidade de deformação é comprometida pela localização de deformações. Esta é uma desvantagem quando comparada com uma solução em BA utilizada no protótipo C-F-1. No último caso, a carga que leva à cedência das armaduras pode ser sustentada para uma grande capacidade de deformação que seriam ainda maior se os testes não fossem interrompidos antes de se atingir a rotura.

Ainda assim, o protótipo C-F-2 exibiu uma maior rigidez de flexão, o que é significativo para a aplicação prevista. O efeito das fibras é mais evidente na Figura 10 (b), que compara as curvas em termos de carga-deslocamento normalizadas pelas respectivas cargas de cedência e pela flecha de cedência do protótipo C-F-1. Para cargas de cedência equivalentes, é possível obter respostas significativamente mais rígidas na fase elástica das armaduras quando se utiliza UHPFRC. Por exemplo, ao comparar as flechas para uma carga representativa do estado limite do serviço, cerca de 50% da carga de pico de C-F-2, pode observar-se uma redução da flecha para apenas 30% daquela observada em C-F-1, para a mesma carga.

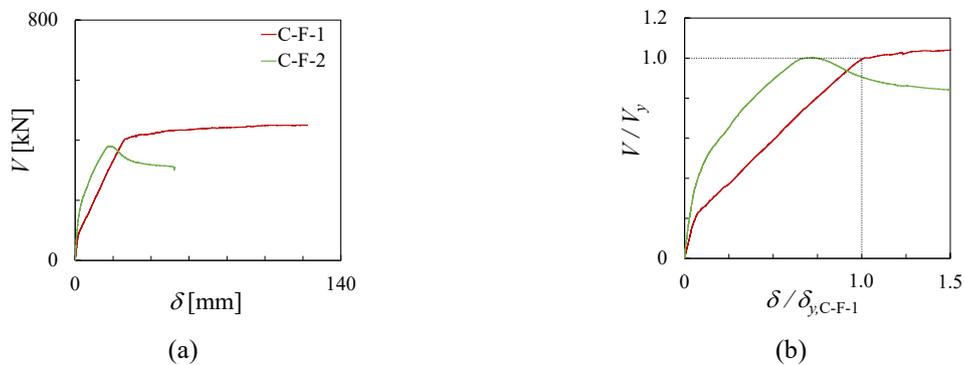


Figura 10. Efeito da solução de laje de continuidade na deformação.

## 5. ANÁLISE

A comparação entre as resistências calculadas e experimentais é indicada na Figura 11 (a) e (b) para ambas as soluções C-F-1 e C-F-2, respetivamente. A carga calculada baseia-se na resistência à flexão determinada a partir da análise seccional da secção de interface entre o diafragma e a viga. O diagrama

parábola-retângulo de acordo com [5] foi utilizado para o betão comprimido. Para as armaduras longitudinais, foram consideradas leis constitutivas bilineares. Para o protótipo C-F-1 é negligenciada a resistência pós-fissuração do betão convencional. A previsão da capacidade de carga apenas subestima ligeiramente aquela obtida no teste de C-F-1.

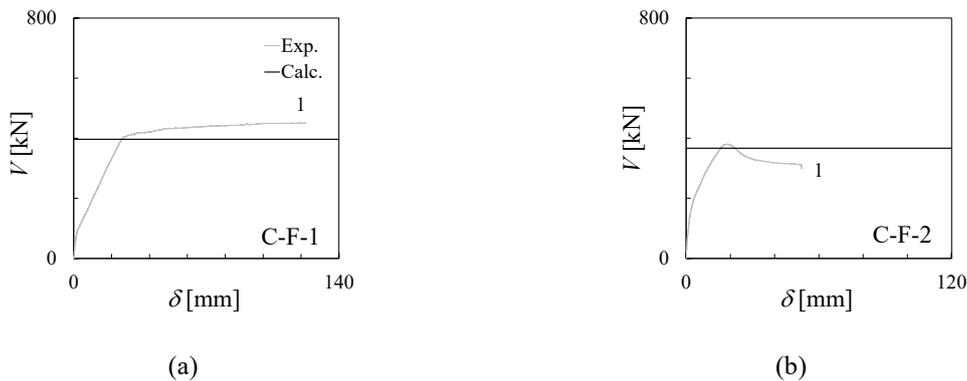


Figura 11. Comparação entre resistências experimentais e calculadas a partir de análise seccional para (a) C-F-1 e (b) C-F-2.

A Figura 12 mostra as leis constitutivas para o R-UHPFRC simplificadas e detalhadas, de acordo com [3, 6]. Essas leis consideram o efeito combinado das armaduras com o UHPFRC. Para determinar o momento de flexão de pico, apenas a tensão máxima que pode ser mobilizada na laje R-UHPFRC é relevante. Como não há diferença significativa entre o modelo simplificado e detalhado, o primeiro é utilizado na análise seccional. Nas figuras são também indicadas as contribuições individuais das armaduras e do UHPFRC de acordo com o modelo simplificado para R-UHPFRC.

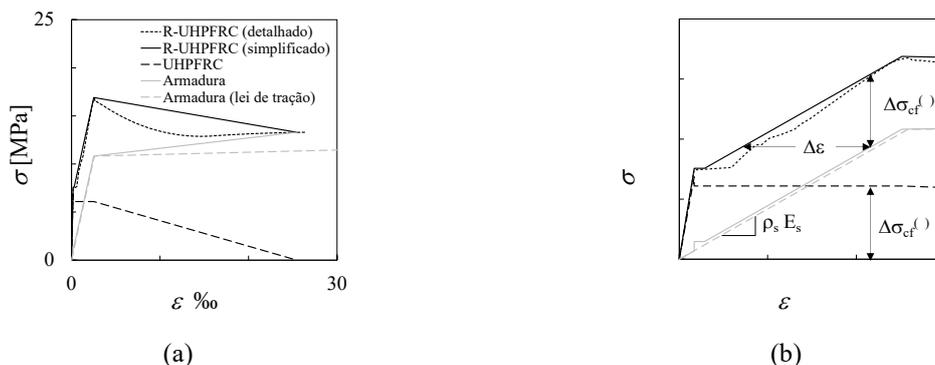


Figura 12. Leis constitutivas de tração totais (a) e pré-pico (b) para a laje R-UHPFRC .

A resistência de pós-fissuração do UHPFRC utilizada na análise seccional foi estimada com base nos resultados dos testes de caracterização descritos na secção 2. É feita uma correção para atender aos diferentes efeitos de parede entre os provetes utilizados para a caracterização e a laje utilizado no ensaio. Devido à menor importância do efeito de parede no caso da laje em UHPFRC, a resistência média de pós-fissuração reduz-se para 6.1 MPa. O cálculo subjacente à estimativa deste valor pode ser consultado em [3]. Observa-se uma boa concordância entre a força máxima calculada e a experimental, validando a abordagem proposta.

O comportamento de flexão pós-pico é analisado através da análise seccional que recorre ao modelo detalhado e simplificado para o comportamento uniaxial do R-UHPFRC. Para a definição da curva pós-pico, o comprimento característico onde ocorre a localização das deformações precisa de ser definido. Uma vez que os resultados calculados e experimentais são comparados em termos de deformações ao longo da base de medida do LVDT 11, o comprimento característico corresponde a 500 mm. O comportamento pós-pico é essencialmente governado pelo comportamento à tração da laje. Além disso, as deformações da laje dentro do intervalo de LVDT 11 são governadas pela zona onde ocorre a

localização das deformações. A Figura 13 (a) compara as curvas experimentais e calculadas. Para o cálculo utilizando o modelo detalhado, foi utilizada uma lei constitutiva típica para um aço laminado a quente com uma extensão  $\varepsilon_{sh} = 20\%$  no início do endurecimento.

Note-se que a análise seccional utiliza a hipótese de Bernoulli numa região de descontinuidade, sendo assumida uma geometria da secção transversal constante ao longo de um desenvolvimento longitudinal de 500 mm, que inclui tanto a viga como o diafragma. Isto é uma simplificação bastante grosseira. Por essa razão, existe uma diferença entre respostas calculadas e experimentais da fase pré-pico, mas que não é o foco deste estudo e não é tão relevante. Como esperado, tanto o cálculo simplificado como o detalhado fornecem deformações últimas semelhantes e que são muito próximas daquelas observadas experimentalmente. No entanto, as tensões na fase pós-pico são sobrestimadas pelo modelo simplificado relativamente ao modelo detalhado, como já tinha sido discutido em [6]. Para além da ligeira subestimação das tensões de pico e pós-pico, o modelo detalhado prevê a forma da curva. De acordo com os cálculos, a rotura ocorreu devido à exaustão da capacidade de deformação longitudinal da laje em R-UHPFRC, que é corroborado pela observação experimental.

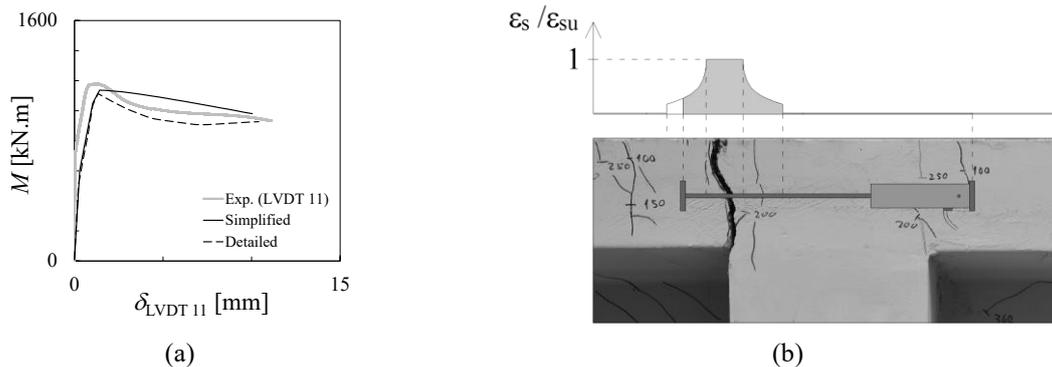


Figura 13 – Análise da zona de localização de deformações

Na Figura 13 (b) apresenta-se uma vista aproximada da laje junto do diafragma onde ocorreu a localização das deformações. Além disso, é fornecido um perfil de deformações longitudinais com base nos cálculos utilizando o modelo detalhado. De acordo com o modelo de cálculo, as deformações no momento da rotura concentram-se num desenvolvimento de aproximadamente 200 mm perto da fissura crítica. Considerando a posição da fissura crítica, a extensão da zona de concentração de deformações e a sua proximidade ao ponto de fixação do LVDT 11, pode-se concluir que parte da deformação pode ter ocorrido fora da base de medição do LVDT 11. Uma vez que os modelos de cálculo consideram a totalidade das deformações, então as previsões das deformações finais fornecidas na Figura 13 (a) teriam de ser reduzidas apenas de cerca de 5%.

## 6. CONCLUSÕES

A campanha experimental descrita neste artigo visa validar uma nova solução para a continuidade para tabuleiros de pontes que utilizam vigas pré-fabricadas em HPFRC. Pretende-se comparar o comportamento à flexão entre soluções de continuidade inovadoras utilizando UHPFRC com soluções convencionais em BA.

Os resultados indicam que a solução de laje com UHPFRC oferece benefícios em termos de aumento da rigidez de flexão, resultando em curvaturas e flechas reduzidas. Por exemplo, a 50% da carga de pico, esta solução apresentou uma flecha sob a posição de carga de cerca 30% daquela que se obteve numa solução convencional de continuidade em BA. Além disso, a maioria das fissuras são significativamente mais pequenas e quase impercetíveis visualmente. A utilização do R-UHPFRC na zona da ligação tem a desvantagem de reduzir a ductilidade devido à localização das deformações após a cedência das armaduras longitudinais e que não permitem redistribuição de momentos fletores. Isto pode ser um requisito em determinadas aplicações estruturais. No entanto, no caso das pontes ferroviárias a

redistribuição de momentos fletores não é relevante, na medida em que é estado de limite de fissuração que dita geralmente o dimensionamento da armadura de flexão na zona de ligação. Assim sendo, nestes casos, os benefícios da utilização de uma laje de ligação em R-UHPFRC podem ser plenamente explorados.

Na análise seccional do comportamento à flexão da zona de ligação foram adotadas metodologias previamente desenvolvidas para determinar o comportamento de tração de tirantes em R-UHPFRC. Estas metodologias são compatíveis com a prática corrente de engenharia e exibiram previsões adequadas da carga de pico e da capacidade de deformação.

## **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).

Os primeiros autores agradecem o apoio da FCT através das bolsas de doutoramento PD/BD/143147/2019 e PD/BD/03238/2023.

## **REFERÊNCIAS**

1. Nunes, S., M. Pimentel, and C. Sousa. *Mechanical and Fracture Behaviour of an HPFRC*. in *Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations II: X RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete (BEFIB) 2021 10*. 2022. Springer.
2. Blazy, J., et al. *Development of an HPFRC for Use in Flat Slabs*. in *RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete*. 2020. Springer.
3. Valente, R., *Mechanical Models for Fibre Reinforced Cementitious Composites - Application to the Design of a Precast Railway Bridge Deck*, in *Departamento de Engenharia Civil*. 2024, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto (to be published).
4. CEN, *EN 10138-3 - Prestressing steels - Part 3: Strand*. 2005, European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
5. *fib, Model Code for Concrete Structures 2010*. 2013, Lausanne, Switzerland International Federation for Structural Concrete (*fib*).
6. Valente, R. and M. Pimentel, *Tensile Response of Reinforced Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites: Modeling and Design Recommendations*. *ACI Structural Journal*, 2023. **120**(1): p. 13.