

Competições de simulação cega de estruturas de betão reforçadas com fibras – relevância e resultados

Joaquim A. O. Barros¹

¹ ISISE, ARISE, Department of Civil Engineering, University of Minho, Azurém 4800-058
Guimarães, Portugal
barros@civil.uminho.pt

Resumo. Neste artigo são apresentados os resultados essenciais das duas competições de simulação cega realizadas ao abrigo do grupo de trabalho do *fib* WP 2.4.1 (<https://www.fib-international.org/commissions/com2-analysis-design.html>) para avaliação da capacidade preditiva de modelos baseados no método dos elementos finitos na simulação do comportamento de estruturas de betão reforçado com fibras.

Palavras-chave: Betão reforçado com fibras, método dos elementos finitos, análise não linear material, competição de simulação cega.

1 Introdução

Para avaliar a capacidade preditiva de modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos (MEF) na simulação do comportamento de estruturas de betão reforçado com fibras (BRF), o *fib* WP 2.4.1 organizou até ao momento duas competições de simulação cega (CSC). A primeira foi dedicada à simulação até à rotura de vigas de secção T em que as fibras foram utilizadas com o principal propósito de reforço ao corte. A segunda CSC foi dedicada à avaliação da capacidade preditiva dos mesmos tipos de modelos na previsão, para estados limites de serviço, do comportamento de estruturas de BRF com rotura por flexão. Dado que informação detalhada sobre estas duas CSC se encontra em [1] e [2], respetivamente, aqui apenas se apresentam as conclusões essenciais destas duas iniciativas.

2 Competições de simulação cega

2.1 1ª CSC: Vigas de BRF com previsão de rotura por corte

Na Fig. 1 apresenta-se a geometria, condições de apoio e de carregamento de duas vigas iguais ensaiadas experimentalmente nesta CSC.

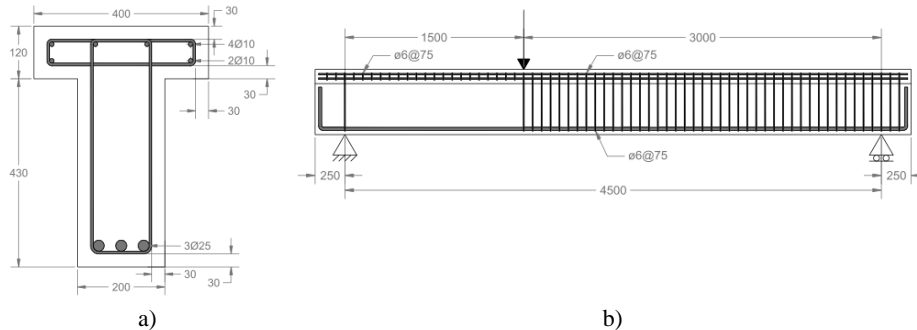


Fig. 1. Geometria da viga: a) Seção transversal, e b) vista lateral (dimensões em mm).

O betão reforçado com fibras de aço (BRFA) utilizado na execução destas duas vigas apresentou aos 14 dias uma resistência média à compressão em cilindros de 64.2 MPa [1.5 MPa] e módulo de elasticidade de 32.9 GPa [0.4 GPa]. Os ensaios de flexão em viga entalhada realizados de acordo com as recomendações do Model Code 2010 [3] conduziu aos seguintes valores de resistência residual em tração por flexão para abertura da boca do entalhe de, respetivamente, 0.5 e 2.5 mm: $f_{R,1m} = 4.79$ MPa [0.70 MPa] e $f_{R,3m} = 3.16$ MPa [0.52 MPa]. O valor entre [] é o coeficiente de variação da correspondente entidade. As armaduras com diâmetro de 6, 10 e 25 mm apresentaram a seguinte tensão de cedência e última: 527 MPa [11 MPa] e 700 MPa [16 MPa] (6 mm); 538 MPa [7 MPa] e 696 MPa [6 MPa] (10 mm); 557 MPa [2 MPa] e 678 MPa [1 MPa] (25 mm).

Na Fig. 2 representa-se o sistema de monitorização adotado nos ensaios experimentais, que consistiu no registo da força aplicada, na flecha na secção carregada, e na extensão no betão ao nível da armadura de flexão.

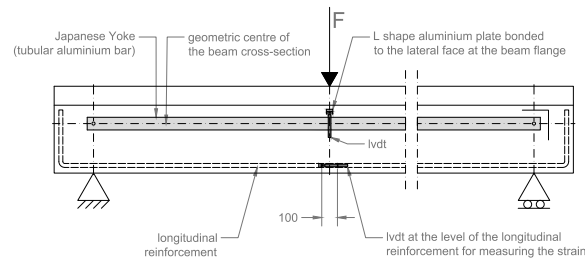


Fig. 2. Sistema de monitorização (dimensões em mm).

Foram recebidas participações com os cinco seguintes tipos de modelos numéricos: modelos de fendilhação distribuída (SCM), 46%; Modelos de fendilhação discreta (DCM), 8%; Modelos de dano com plasticidade no betão (CDP), 30%, Modelos de partículas discretas em treliça (LDPM), 5%; outros, 11%. Na Fig. 3 comparam-se as previsões dos modelos com os resultados obtidos experimentalmente.

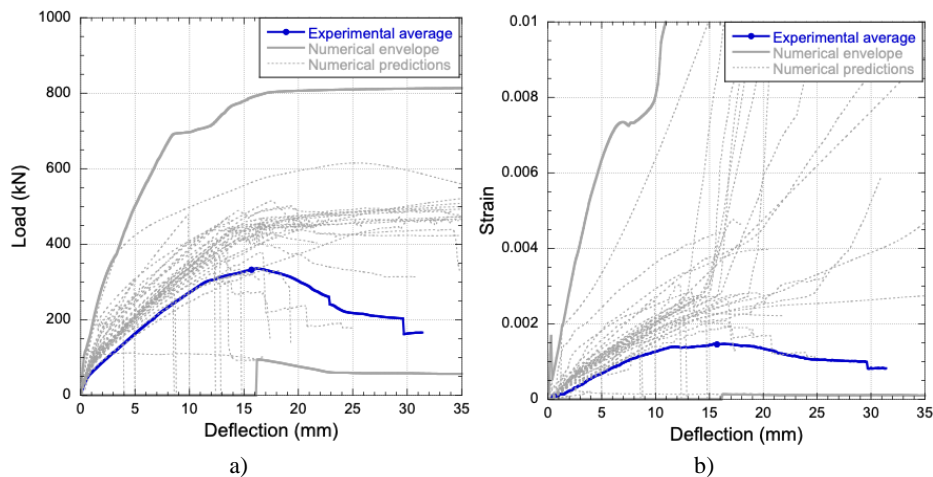


Fig. 3. Resultados experimentais, envolvente e resultados individuais das previsões numéricas dos participantes em termos de: a) carga vs flecha, e b) extensão vs flecha.

Apesar dos dois primeiros classificados terem utilizado SCM, a dispersão na previsão utilizando esta classe de modelos foi a mais elevada entre as classes empregues pelos participantes. Constatou-se ainda que as previsões efetuadas com software comercial foram melhores e com menor dispersão que as obtidas com software não comercial. Apesar de ter sido fornecida toda a informação que um projetista deste tipo de estruturas terá acesso (na melhor das circunstâncias), erros máximos de 40%, 113% de 600% foram registados na previsão da capacidade de carga da viga, flecha e extensão na rotura, respetivamente. Além disto, foram previstos modos de rotura incorretos, e simulações com o mesmo software estimaram resultados bastante distintos.

2.2 2ª CSC: Vigas de BRF com previsão de rotura por flexão

A 2ª CSC teve como principal objetivo avaliar a capacidade preditiva dos tipos de modelos já utilizados na 1ª CSC, mas agora com o foco na previsão do comportamento para estados limites de serviço de elementos de BRF hiperestáticos com rotura por flexão. A geometria, armaduras, carregamento e condições de apoio dos dois protótipos gémeos ensaiados encontram-se representados na Fig. 4. Este protótipo pretende ser representativo de uma faixa de laje apoiada em estacas ou pilares, no alinhamento destes, envolvendo dois vãos em continuidade, e tendo como reforço armaduras convencionais de flexão e fibras (R/FRC). A utilização de fibras neste tipo de aplicações tem aumentado significativamente [4], pois tem-se constatado ser possível eliminar a armadura convencional superior de flexão e de esforço transversal/punçoamento, o que acelera o seu processo construtivo, resultando benefícios económicos.

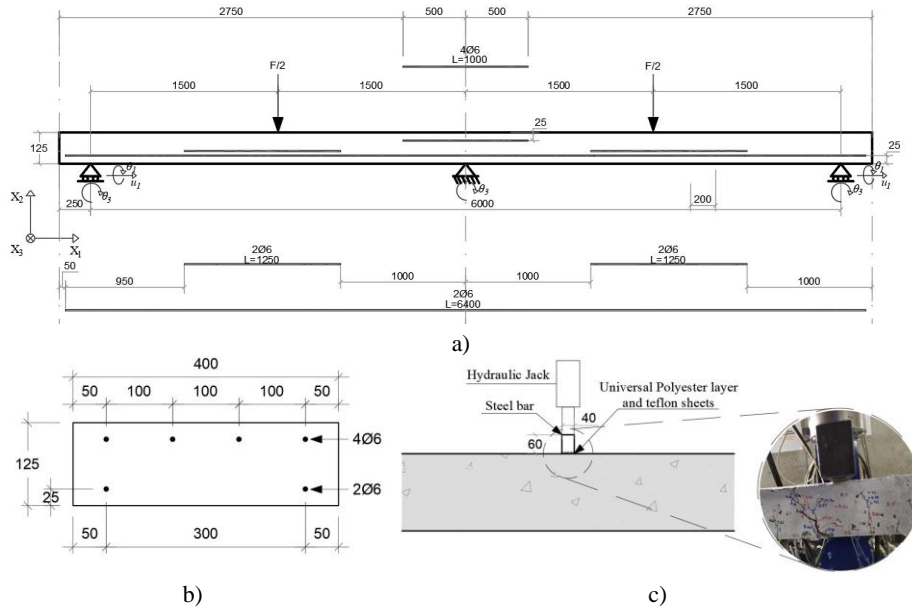
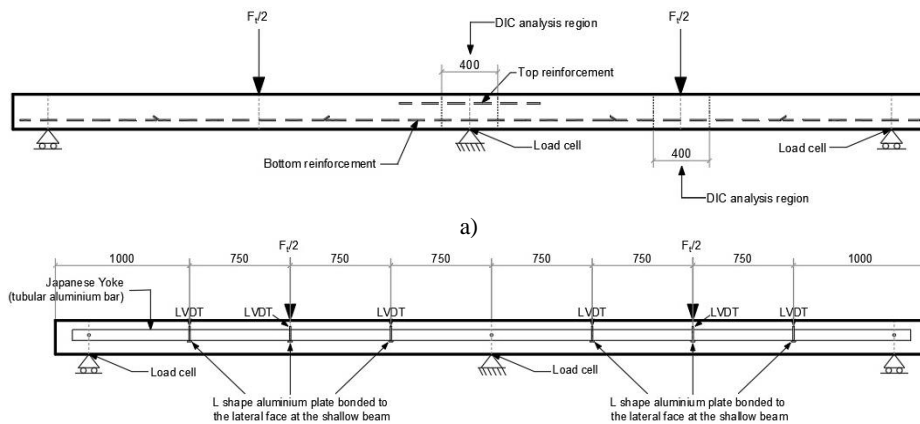


Fig. 4. Geometria dos protótipos ensaiados: a) vista longitudinal; b) seção transversal na região do apoio central; e c) detalhe das condições de carregamento (dimensões em mm).

O BRFA utilizado na execução destas duas vigas esbeltas apresentou aos 19 dias uma resistência média à compressão em cilindros de 57.8 MPa [1.0 MPa], módulo de elasticidade de 31.9 GPa [0.4 GPa] e $f_{R,1m}=6.2$ MPa [1.5 MPa] e $f_{R,3m}=7.6$ MPa [1.4 MPa]. Os valores médios do módulo de elasticidade, tensão de cedência e resistência à tração dos varões nervurados de 6 mm de diâmetro utilizados como armadura de flexão foram 222199 MPa, 627.25 MPa e 769.57 MPa com desvio padrão de 14970 MPa, 15.41 MPa e 13.27 MPa, respetivamente.

A Fig. 5 representa o sistema de monitorização adotado, tendo a abertura de fissura sido obtido através de correlação de imagem digital (DIC), quer na zona de aplicação das cargas, como na do apoio intermédio.



b)

Fig. 5. Sistema de monitorização: a) Vista frontal; b) Visa posterior (dimensões em mm).

Nas Figs. 6 e 7 comparam-se os resultados experimentais com os obtidos numericamente pelos participantes.

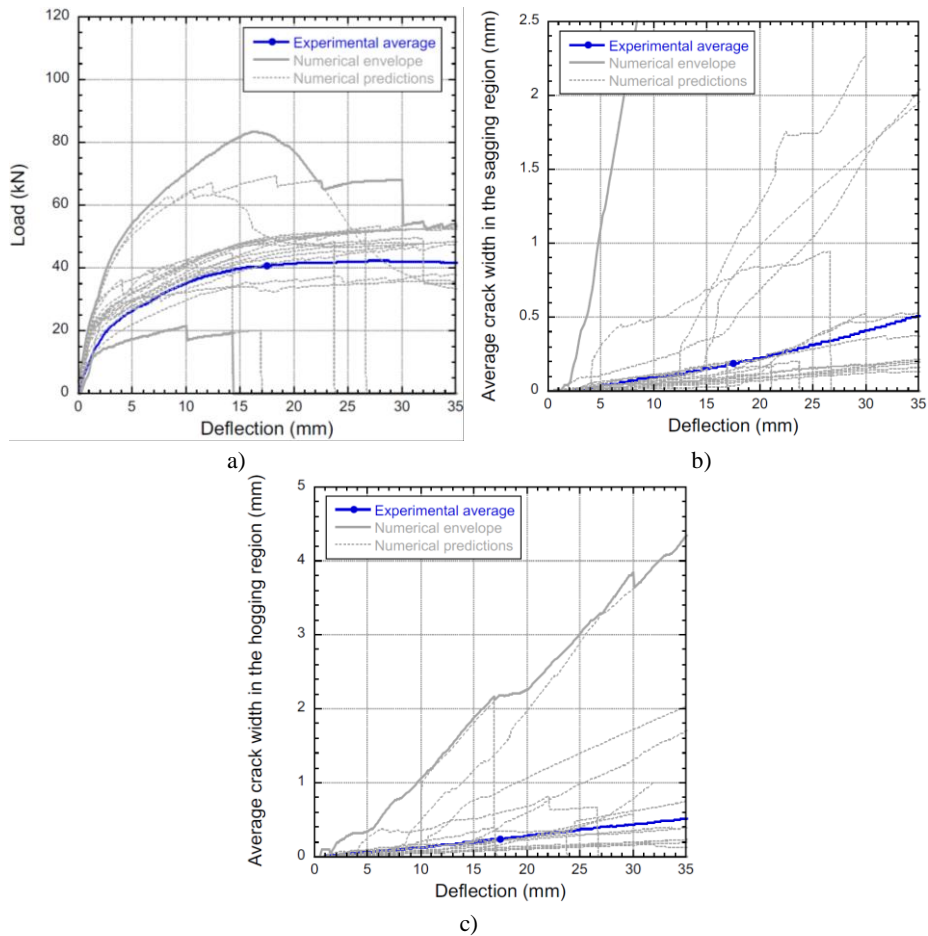


Fig. 6. Resultados experimentais, envolvente e resultados individuais obtidos numericamente pelos participantes em termos de: a) força vs flecha, b) abertura média de fenda na região do carregamento vs flecha, e c) abertura média de fenda na região do apoio central vs flecha.

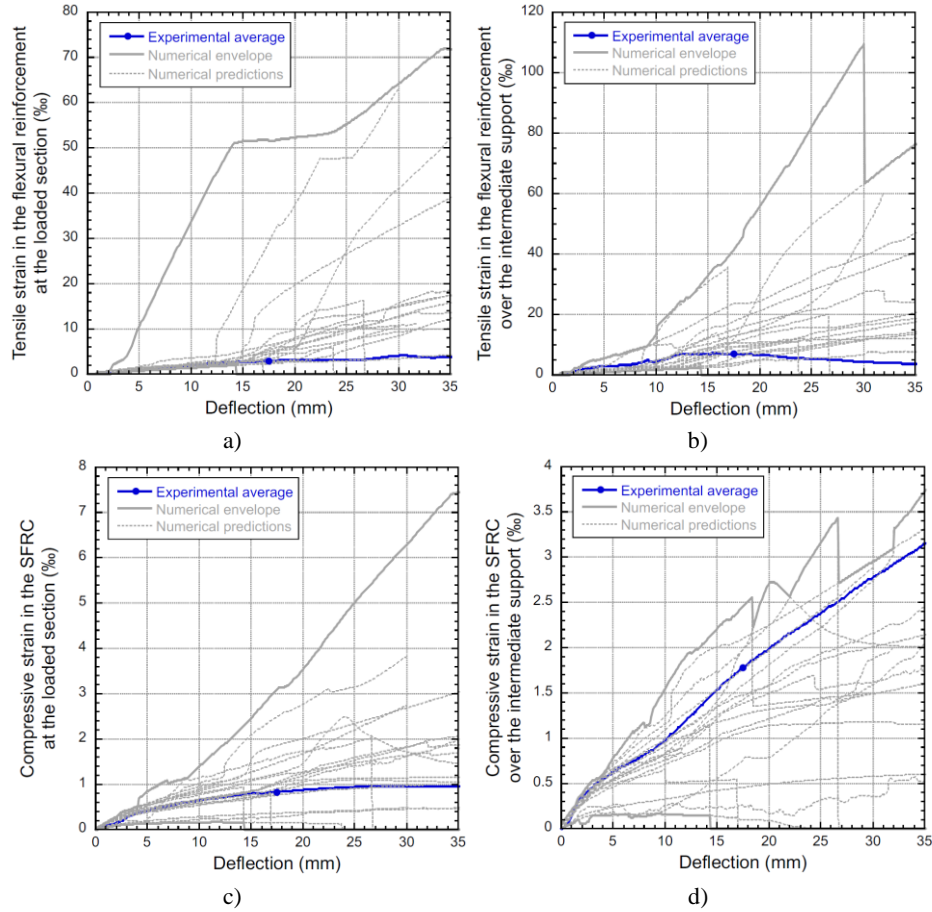


Fig. 7. Resultados experimentais, envolvente e resultados individuais obtidos numericamente pelos participantes em termos de: a) extensão de tração nas armaduras da região do carregamento vs flecha, b) extensão de tração nas armaduras superiores da região do apoio central vs flecha, c) extensão de compressão no BRFA na região do carregamento vs flecha, e d) extensão de compressão no BRFA na região do apoio central vs flecha.

Da análise dos resultados foi possível extrair as seguintes conclusões:

- 1) As simulações com DCM e CDP garantiram, respetivamente, as melhores e piores previsões;
- 2) As previsões com software não comercial asseguraram melhores previsões que as com software comercial;
- 3) As simulações com modelos LDPM e DCM garantiram simulações com melhor previsão em praticamente todas as variáveis analisadas do que as simulações com modelos SCM e CDP;
- 4) A maior diferença em termos de capacidade preditiva entre as simulações com LDPM e DCM em relação às com modelos SCM e CDP foi principalmente em termos de extensões nas armaduras convencionais e na abertura média de fissura.

3 Conclusões

As duas competições de simulação cega evidenciaram que os modelos de análise e dimensionamento de estruturas de BRF atualmente existentes requerem ainda melhoramentos significativos para aumentar a sua capacidade preditiva, principalmente nas verificações para estados limites de serviço. Estas verificações são efetuadas com maior fiabilidade quando se utilizam modelos de fendas discretas. A obtenção de resultados muito diferentes com o mesmo software demonstra a necessidade de formação dos utilizadores deste tipo de ferramentas numéricas.

Agradecimentos

O Autor agradece o apoio concedido pela FCT através do projeto FemWebAI, com referência PTDC/ECI-EST/6300/2020.

Referências

1. Barros et al. (2021) Blind competition on the numerical simulation of steel fibre reinforced concrete beams failing in shear. *fib Structural Concrete Journal*, 22(2), 939-967. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.202000345>
2. Barros et al. (2023) Blind competition on the numerical simulation of continuous shallow steel-fibre reinforced concrete beams failing in bending. *fib Structural Concrete Journal*. <https://doi.org/10.1002/suco.202200754>
3. *fib Model Code 2010: fib Model Code for Concrete Structures 2010*.
4. ACI 544.6R-15, "Report on design and construction of steel fiber-reinforced concrete elevated slabs", Reported by ACI Committee 544, 2015.