

Reforço ao corte de vigas em betão armado recorrendo a painéis em micro betão auto compactável reforçado com fibras metálicas de pneus reciclados

Lúcio Lourenço⁽¹⁾, Ziaaddin Zamanzadeh⁽²⁾, Joaquim Barros⁽³⁾,
Delfina Gonçalves⁽¹⁾ e Inês Costa⁽¹⁾

⁽¹⁾ CiviTest – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda., Vila Nova de Famalicão, Portugal.

⁽²⁾ Islamic Azad University, Bostanabad, Iran. ⁽³⁾ Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6143>

RESUMO

No passado recente, o grupo de investigação "Structural Composites" da Universidade do Minho e a empresa CiviTest – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda. têm realizado vários estudos experimentais e numéricos avançados, em parceria, que permitiram a aquisição de conhecimento e o desenvolvimento de materiais de matriz cimentícia reforçados com fibras recicladas (BRFR), nomeadamente as provenientes da indústria da reciclagem de pneus. A investigação desenvolvida tem evidenciado que as fibras recicladas possuem elevadas potencialidades como reforço efetivo do betão, nomeadamente no reforço ao corte. No presente trabalho pretende-se apresentar os resultados relativos à avaliação da eficácia do reforço ao corte de vigas em betão por intermédio da aplicação de finos painéis em microbetão auto-compactável reforçado com fibras de aço de pneus reciclados nas faces de vigas de betão armado existentes. Para tal foram efetuados ensaios comparativos de resistência ao corte entre vigas em betão armado de referência (viga I com $1.25 \times 0.17 \times 0.30 \text{ m}^3$; alma com 0.09 m) e vigas similares reforçadas na alma com painéis de 2 cm de espessura em microbetão auto-compactável reforçado com fibras recicladas usando dois sistemas distintos de fixação às respetivas vigas em betão armado. A eficiência da aplicação dos referidos painéis em vigas demonstrou que é possível obter aumentos de capacidade de carga da ordem dos 250% em vigas não fendilhadas e em vigas previamente fendilhadas. Os resultados e conclusões obtidos são apresentados na presente publicação.

PALAVRAS-CHAVE: reforço ao corte; fibras recicladas; reciclagem de pneus.

1.- INTRODUÇÃO

O betão é o material de construção mais utilizado no mundo. Contudo, comparativamente a outros materiais, apresenta reduzida resistência à tração, ductilidade e absorção de energia. Uma das formas correntes de melhorar o comportamento mecânico do betão passa pela

Reforço ao corte de vigas em betão armado recorrendo a painéis em micro betão...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

adição de fibras (geralmente 0,5% a 2,0% em volume) durante o processo de amassadura. De facto, a adição de fibras à matriz cimentícia do betão oferece a este uma maior resistência à propagação e abertura de fendas. Encontram-se, na bibliografia, inúmeras referências em que se constata as várias vantagens de utilização de fibras para o reforço do betão. A utilização de fibras para o reforço do betão é, atualmente, ampla, incluindo o fabrico de elementos estruturais para edifícios e em viadutos, pontes, pistas de aeroportos, indústria da pré-fabricação de elementos de betão e túneis [1-4].

O grupo de investigação "Structural Composites" da Universidade do Minho e a empresa CiviTest – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda. têm realizado, no passado recente, várias campanhas experimentais e estudos numéricos avançados, em parceria, que têm permitido a aquisição de conhecimento e o desenvolvimento de materiais de matriz cimentícia reforçados com fibras recicladas. De facto, a adição de fibras de aço provenientes de pneus reciclados (aqui abreviadas pelo acrónimo “RSF”) a materiais de base cimentícia pode diminuir significativamente o comportamento frágil destes materiais, melhorando a sua ductilidade e resistência pós-fendilhação. Neste sentido, o Betão Reforçado com Fibras de Aço Recicladas (RSFRC) surge como uma opção tecnicamente eficiente e amiga do ambiente (as fibras provenientes da reciclagem dos pneus são, atualmente, um resíduo) para várias aplicações estruturais e não estruturais [5,6]. Por outro lado, a utilização de painéis de espessura reduzida em materiais cimentícios com comportamento de endurecimento em tração (*Strain Hardening Cement Composites*, SHCC) tem demonstrado uma grande potencialidade para o reforço estrutural, nomeadamente com a inclusão de laminados discretos em polímero reforçado com fibras de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*, CFRP) [7].

Neste contexto, os autores desenvolveram um programa experimental visando a avaliação da eficácia da utilização de finos painéis em argamassa auto-compactável reforçada com fibras de aço proveniente da indústria da reciclagem de pneus (*Recycled Steel Fibre Reinforced Mortar*, RSFRM) para o reforço ao corte de vigas de betão armado. A avaliação da eficácia do reforço estrutural foi efetuada recorrendo à aplicação deste tipo de painéis nas faces laterais de vigas de Betão Armado (RC), com secção transversal em I e défice de reforço ao corte face à capacidade de carga em flexão. A colocação dos painéis em RSFRM foi efetuada recorrendo a dois tipos diferentes de ligação ao betão (ver Figura 1).

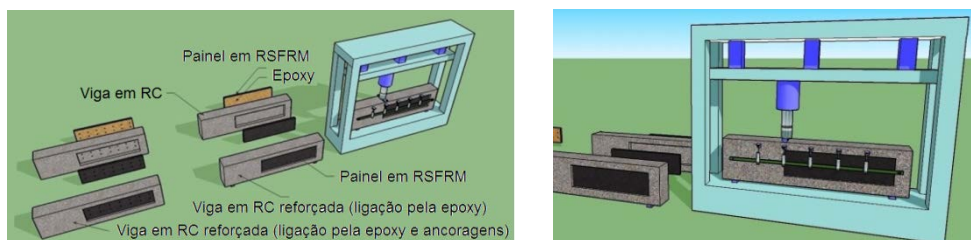


Figura 1. Apresentação genérica relativa ao reforço de vigas em Betão Armado recorrendo a painéis em RSFRM

2.- PROGRAMA EXPERIMENTAL

Os provetes (vigas de escala 1/4) do presente programa experimental apresentam um comprimento de 1250 mm e uma distância entre apoios de 1040 mm (conforme Figura 2). O reforço longitudinal em varões de aço (armadura convencional) é constituído por 2 varões de 20 mm de diâmetro (face inferior) e 2 varões de 10 mm de diâmetro (face superior), dando à secção uma profundidade efetiva (d) de 260 mm. Com o intuito de promover a ocorrência de rotura por corte num dos vãos de corte, optou-se por um *setup* de ensaio de flexão em três pontos com uma relação (a/d) de 2.65. Para além disto, o vão de rotura dispunha de secção transversal em I, com comprimento de 690 mm e nenhum reforço transversal, enquanto o outro vão, de 350 mm de comprimento, foi reforçado com uma percentagem relativamente elevada de armadura transversal (varões de 10 mm de diâmetro espaçados a cada 100 mm) e dispunha de secção transversal retangular ($170 \times 300 \text{ mm}^2$) – mais informações sobre as dimensões geométricas dos provetes podem ser obtidas na Figura 5. A Figura 2 apresenta, também, a configuração do ensaio definido e a posição dos 5 transdutores lineares de deslocamento (LVDTs) utilizados para medir a deformação da viga durante a aplicação da carga.

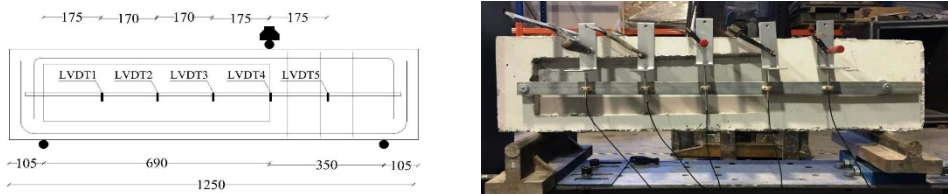


Figura 2. Proвете viga, *setup* de ensaio e posição dos LVDT's (dimensões em mm)

Foram produzidos dez painéis em RSFRM com as dimensões de $686 \times 186 \times 23 \text{ mm}^3$ (ver Figura 3). Os painéis em RSFRM foram aplicados como reforço em duas séries distintas de vigas, diferenciando-se pelo tipo de ligação ao betão: uma primeira série, com ligação conseguida por um adesivo epóxi (série SB-E); a segunda série que, para além do adesivo epóxi referido para a série anterior, incluía a utilização de ancoragens mecânicas na tentativa de aumentar a capacidade de reforço ao corte dos painéis, dando o confinamento extra que os painéis podem conferir ao betão da viga a reforçar proporcionado pelo aperto das ancoragens, bem como a expectável melhoria da ligação entre os painéis de reforço e a alma da viga a reforçar (série SB-EM). As vigas de referência, sem qualquer tipo de reforço ao corte (série SB-c), foram também ensaiadas com objetivo de servir de base de comparação para avaliar o nível de eficácia dos sistemas de reforço adotados. Os painéis restantes foram aplicados numa das vigas de referência após o seu ensaio preliminar (pré-fendilhada) de forma a avaliar a eficácia de reforço dos painéis em situações em que os elementos estruturais se encontram fendilhados.

A aplicação dos painéis RSFRM às faces laterais das vigas passou, primeiro, pela limpeza da superfície das vigas recorrendo a ar comprimido e, depois, com a aplicação de uma camada adesiva de epóxi (S&P 220, com 1 mm de espessura) aplicada homogeneamente,

Reforço ao corte de vigas em betão armado recorrendo a painéis em micro betão...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

tanto nas superfícies da alma da viga em betão como na face interior dos painéis (ver Figura 3d). As propriedades do adesivo podem ser encontradas em Costa e Barros, 2015 [8]). Recorreu-se a grampos de cofragem durante o tempo de presa da epóxi de forma a manter pressionados os painéis contra as superfícies da alma das vigas até ao momento em que a resina adquiriu resistência de ligação suficiente para permitir a sua remoção. Duas semanas após a aplicação dos painéis RSFRM nas faces laterais das vigas, foram realizados dez orifícios (10 mm de diâmetro) através dos painéis e da alma das vigas da série SB-EM para a instalação das ancoragens mecânicas (ver localização na Figura 4). As ancoragens foram aplicadas com um torque de 20 N.m nas porcas existentes em ambas as faces das vigas.

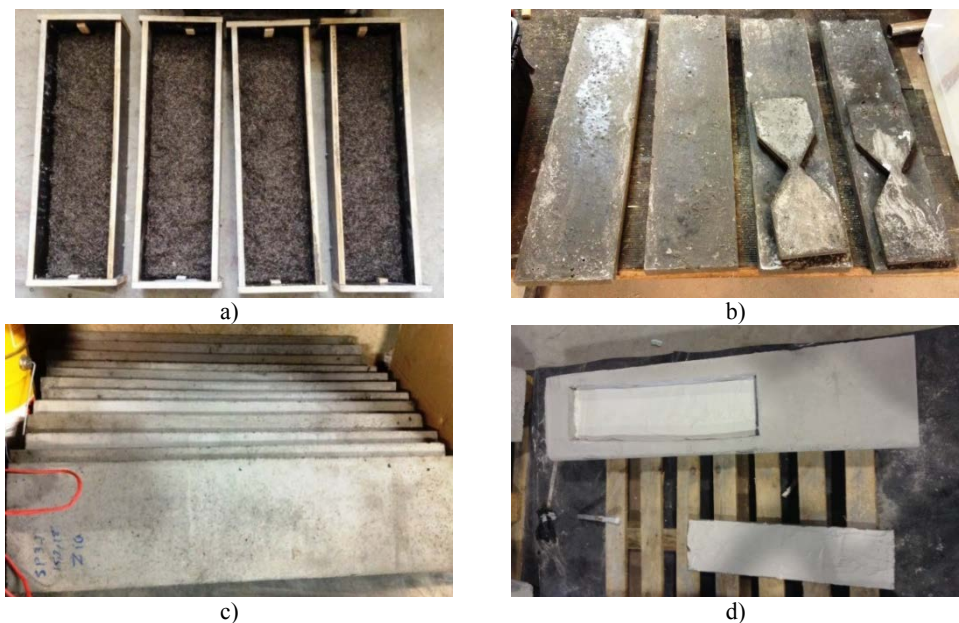


Figura 3. a) RSF colocadas dentro dos moldes; b) painéis RSFRM depois da desmoldagem; c) painéis RSFRM antes da aplicação nas vigas; d) aplicação do adesivo epóxi nas superfícies das vigas em betão e nos painéis

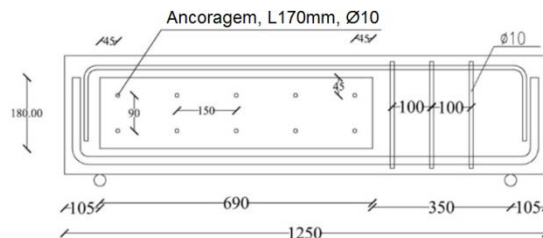


Figura 4. Posição das ancoragens mecânicas (dimensões em mm)

A Figura 5 apresenta a configuração geométrica e a tipologia de reforço das três séries de vigas produzidas para o presente programa experimental, bem como as condições de carregamento e suporte. Mais informações sobre o *setup* de ensaio poderão ser obtidas em [6].

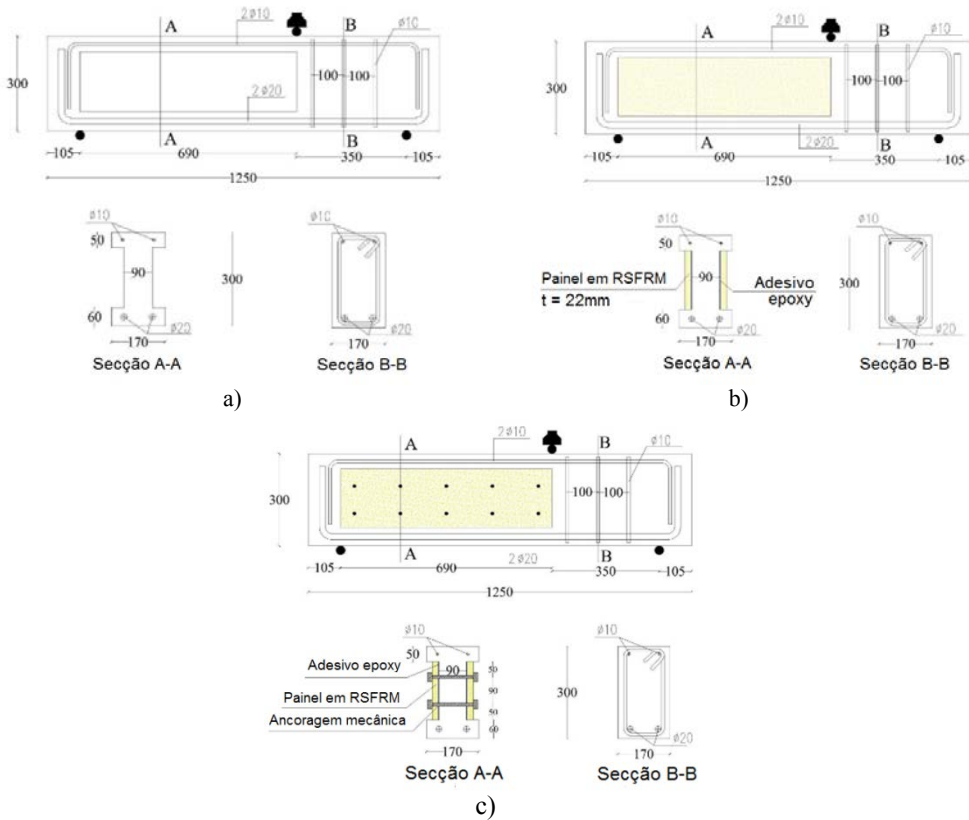


Figura 5. Geometria das três séries das vigas: a) série SB-C; b) série SB-E; c) série SB-EM (dimensões em mm)

A primeira fase dos ensaios experimentais passou pelo ensaio de uma viga por cada uma das três séries. Atendendo ao facto das vigas SB-E1 e SB-EM1 terem entrado em rotura, inesperadamente, na zona de apoio antes da ocorrência do total desenvolvimento da fenda de corte que surgiu na alma da viga, numa segunda fase do programa experimental optou-se pela instalação de um sistema de confinamento dos apoios recorrendo a placas em aço (conforme Figura 6). Os acrónimos SB-C2, SB-E2 e SB-EM2 identificam, desta forma, as vigas em RC ensaiadas na segunda fase do programa experimental. Na terceira e última fase do programa experimental, avaliou-se a eficácia da técnica de reforço com a aplicação dos painéis em RSFRM numa das vigas da série de referência pré-fendilhada, após o ensaio

realizado na primeira fase; isto é, as vigas de referência foram carregadas até à ocorrência de uma fenda corte no vão de ensaio, logo depois, descarregadas e reforçadas (PSB-E).



Figura 6. Chapas metálicas para o confinamento dos apoios

3.- RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A relação entre a carga aplicada e o deslocamento a meio vão (LVDT3, conforme Figura 2) das vigas ensaiadas é apresentada na Figura 7. As roturas obtidas na totalidade das vigas ensaiadas estão apresentadas na Figura 8. Como se pode constatar na Figura 8, somente as vigas SB-C1, SB-C2 e SB-EM2 apresentam uma clara rotura por corte, em ambas as faces da viga, na zona de corte definida para a rotura.

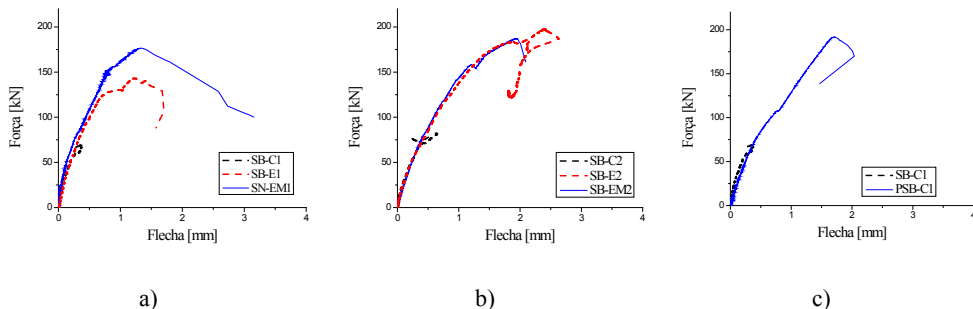


Figura 7. Relação entre carga e flecha na secção carregada para as vigas ensaiadas: a) no primeiro programa experimental; b) no segundo programa experimental; c) no terceiro programa experimental, com a viga pré-fendilhada.

Devido, eventualmente, a uma deficiente execução (ou ineficácia) do reforço longitudinal nas vigas SB-E1 e SB-EM1, estas obtiveram uma rotura imprevista, tanto no apoio como na alma da viga (Figuras 8b e 8c). Desta forma, não foi possível avaliar, com a precisão

desejada, a eficiência “real” no reforço ao corte desta técnica de reforço para os provetes referidos (pela rotura não ter sido por corte). Em qualquer caso, salienta-se que todas as vigas reforçadas apresentaram uma muito maior capacidade de carga do que as vigas de referência (SB-C1 e SB-C2).

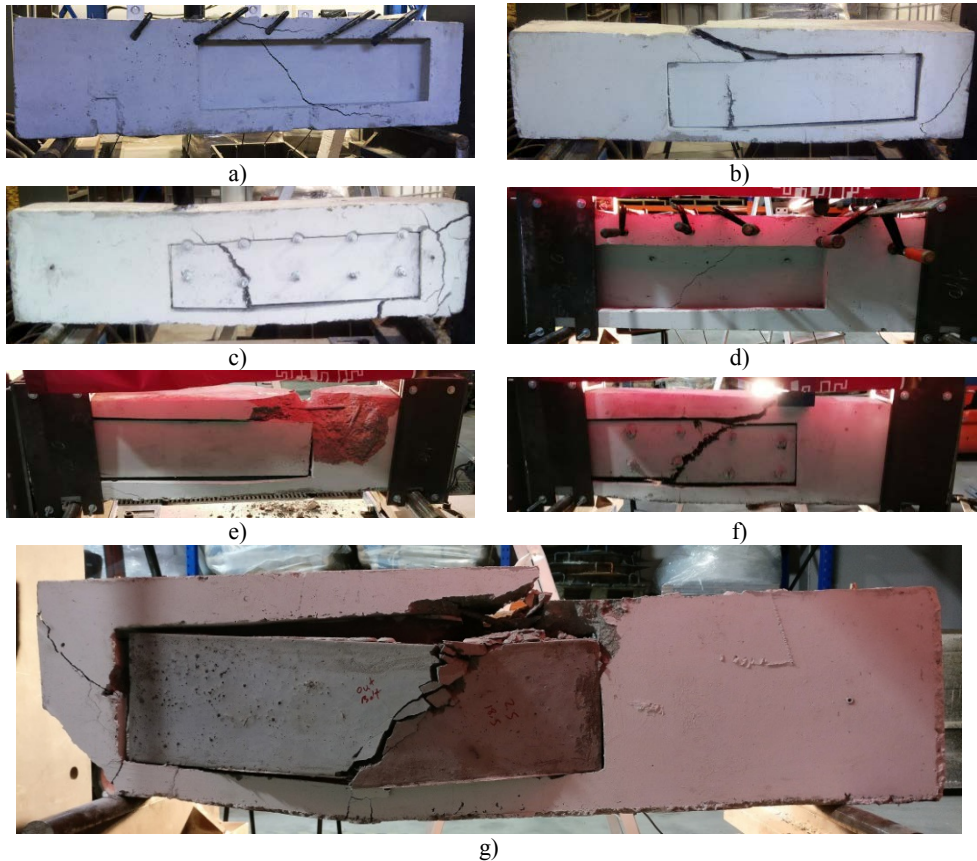


Figura 8. Padrão de fendilhação da totalidade das vigas ensaiadas: a) SB-C1, b) SB-E1, c) SB-EM1, d) SB-C2, e) SB-E2, f) SB-EM2, g) PSB-E1

O Quadro 1 apresenta a capacidade de carga máxima das vigas testadas (F_{max}) e a respetiva flecha a meio vão (Δ_u). Também no Quadro 1 apresenta-se F_{max}^{SB-Ci} e Δ_u^{SB-Ci} , a capacidade máxima de carga, a correspondente flecha média das vigas SB-C, respetivamente (a relação entre a F_{max} obtida nas vigas reforçadas e as vigas de referência é, igualmente, apresentada).

A viga SB-E2 entrou em rotura a um nível de carga superior à carga máxima registada para a viga SB-EM2 (ver Quadro 1): a viga SB-E2 entrou em rotura devido ao destacamento do betão na secção de carga (esmagamento no ponto de aplicação de carga), sem rotura por

corte (Figura 8e); a viga SB-EM2 desenvolveu rotura por corte na zona expectável (Figura 8f). Desta forma, constata-se que o uso das ancoragens mecânicas não conduziram a uma melhoria significativa da técnica de reforço adotada para o reforço ao corte desta série de vigas (esta irrelevante melhoria foi, também, comprovada pelas simulações numéricas desenvolvidas). A partir dos resultados apresentados no Quadro 1, a flecha máxima para a carga máxima nas vigas SB-E1 e SB-EM1 foi 3.40 e 3.66 vezes maior que a flecha da viga SB-C1, respetivamente. A capacidade de carga máxima das vigas SB-E1 e SB-EM1 foi 2.07 e 2.55 vezes superior à capacidade de carga máxima da viga de referência (SB-C1). Por outro lado, a capacidade de carga máxima das vigas SB-E2 e SB-EM2 foi 2.39 e 2.27 vezes superior à capacidade máxima de carga da correspondente viga de referência (SB-C2). Além disso, os resultados obtidos para a viga PSB-E1 revelam que esta série de vigas entrou em rotura para carga 2.77 e 2.32 vezes superior à capacidade de carga máxima das vigas BS-C1 e BS-C2, respetivamente, o que faz constatar a significativa eficácia do reforço ao corte proporcionada pelos painéis em RSFRM para este tipo de vigas.

Quadro 1. Resultados relativos à capacidade máxima de carga e correspondente flecha a meio vão

Designação do provete	Flecha a meio vão Δ_u [mm]	F_{max} [kN]	$\frac{\Delta_u}{\Delta_u^{SB-Ci}}$	$\frac{F_{max}}{F_{max}^{SB-Ci}}$
SB-C1	0.36	69.10	-	-
SB-E1	1.22	143.18	3.40	2.07
SB-EM1	1.32	176.50	3.66	2.55
SB-C2	0.63	82.54	-	-
SB-E2	2.38	197.34	3.77	2.39
SB-EM2	1.93	187.50	3.06	2.27
PSB-E1	1.70	191.75	4.72	2.77

3.- SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Para uma melhor avaliação da eficácia da técnica de reforço ao corte recorrendo a painéis em RSFRM, foram realizadas, paralelamente aos ensaios experimentais, simulações numéricas em regime não linear material recorrendo a um software baseado no Método dos Elementos Finitos (FEMIX V4.0). A Figura 9 representa a malha de elementos finitos adotada para a simulação das vigas. Aproveitando a simetria das vigas, e com o objetivo de reduzir o tempo computacional para a realização das simulações numéricas, apenas metade da viga foi modelada. Foram utilizados elementos sólidos de 8 nós e integração $2 \times 2 \times 2$ Gauss-Legendre para a simulação da viga em betão e dos painéis em RSFRM (três graus de liberdade por nó). A armadura transversal e longitudinal foi simulada recorrendo a elementos de barra 3D embebidos de 2 nós (um grau de liberdade por nó), usando integração de 2 pontos de Gauss-Legendre, assumindo-se uma perfeita ligação com o material envolvente. Admitiu-se perfeita ligação entre os painéis RSFRM e o betão da alma

da viga nos quais foram aplicados. Mais informações sobre as simulações numéricas efetuadas e as propriedades adoptadas para os materiais poderão ser obtidas em [6].

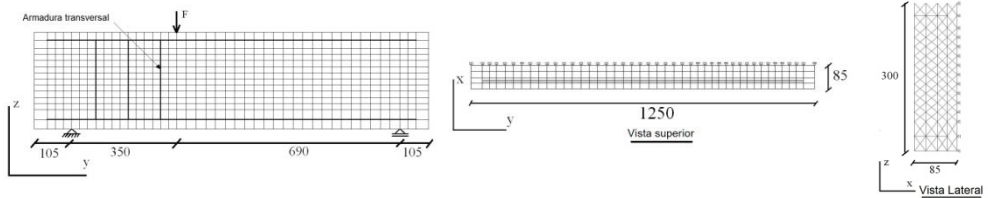


Figura 9. Geometria, malha e condições de apoio da viga SB-C (dimensões em mm)

As relações experimentais e numéricas entre a carga aplicada e a flecha na secção a meio vão das vigas ensaiadas estão apresentadas na Figura 10. A análise da figura permite constatar a boa precisão do modelo numérico na previsão do comportamento mecânico das vigas ensaiadas. Vários estudos paramétricos foram efetuados recorrendo a este modelo numérico de forma a ser possível obter mais informações relativas ao comportamento deste tipo de sistema de reforço (uma síntese pode ser encontrada em Zamanzadeh, 2017 [6]).

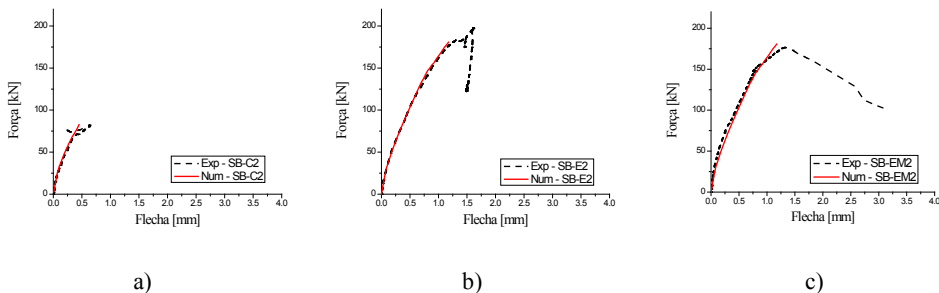


Figura 10. Comparação entre as relações força e deflexão a meio vão obtidas experimental e numericamente: a) SB-C2, b) SB-E2 e c) SB-EM2

4.- CONCLUSÕES

O trabalho apresentado na presente publicação teve como objetivo a avaliação da eficácia do reforço ao corte de vigas de betão armado com secção em I recorrendo à aplicação de painéis finos em RSFRM. Adicionalmente, a técnica de reforço foi aplicada em viga pré-fendilhada. Com base nos resultados apresentados, constatou-se que a capacidade de carga máxima das vigas reforçadas com painéis RSFRM foi 2.07 a 2.55 vezes maior do que a capacidade de carga máxima das vigas de referência (sem qualquer reforço). A flecha máxima a meio vão, para a carga máxima, das vigas reforçadas com painéis RSFRM foi 3.06 a 3.77 vezes superior à flecha das correspondente vigas de referência, o que demonstra, também, a eficácia do reforço ao corte recorrendo a este tipo de painéis.

Reforço ao corte de vigas em betão armado recorrendo a painéis em micro betão...

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

O ensaio experimental nas três séries de vigas foi, também, simulado numericamente recorrendo a uma análise não linear material pelo método dos elementos finitos. A coerência entre os resultados experimentais e numéricos obtidos faz constatar a potencialidade e adequação deste tipo de análises numéricas para a previsão do comportamento de provetes quando reforçados ao corte por painéis em RSFRM.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração das empresas CiviTest – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda. (no apoio à realização dos ensaios experimentais), BioSafe e RECIPTNEU (no fornecimento das fibras de aço recicladas para o reforço do betão).

REFERÊNCIAS

- [1] Bentur, A. and Mindess, S., 'Fibre reinforced cementitious composites', Elsevier, London (1990).
- [2] ACI, 'State of art report on fibre reinforced concrete' American Concrete Institute (ACI) Committee 544 Rep. IR-82 (1996).
- [3] Wang, Y. and Li, V., 'Concrete reinforcement with recycled fibers' Journal of Materials in Civil Engineering (2000) 314-319.
- [4] Lourenço, L., 'Betão reforçado com fibras: aplicações e técnicas de inspeção e reforço de elementos estruturais afetados pela ação de um fogo', Tese de Doutoramento, Universidade do Minho (2012).
- [5] Aiello, M., Leuzzi, F., Centonze, G. and Maffezzoli, A., 'Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength' Waste Management 29(6) (2009) 960-970.
- [6] Zamanzadeh, Z., 'Cement based materials reinforced with recycled steel fibres: mechanical, durability and structural performance', PhD thesis, University of Minho (2017).
- [7] Baghi, H. and Barros, J. 'Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with Hybrid Composite Plate', Composites for Construction Journal, 20(6), December (2016).
- [8] Costa, I and Barros, J., 'Tensile creep of a structural epoxy adhesive: experimental and analytical characterization', International Journal of Adhesion & Adhesives, 59, (2015) 115-124, June.