

MATERIAIS DE ELEVADO DESEMPENHO NA INOVAÇÃO ESTRUTURAL

Joaquim A. O. Barros

Relatório Científico 11-DEC/E-16

Data: Junho 2011

Número de páginas: 16

Palavras chave: Materiais compósitos de matriz polimérica; betão reforçado com fibras;
reforço de estruturas; Estruturas híbridas



Escola de Engenharia



Dep. Eng^a Civil



Universidade do Minho

Azurém, 4800-085 Guimarães





ÍNDICE

1	MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS.....	5
2	ESTADO DE ARTE.....	5
3	ESTRATÉGIA DE IMPLEMENTAÇÃO	7
3.1	INVESTIGAÇÃO	7
3.2	ENSINO.....	13
3.3	TRANSFERÊNCIA DE CONHECIMENTO E TECNOLOGIA	14
4	RESULTADOS ESPERADOS.....	14
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15



1 MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS

Nos últimos anos tem sido efectuado um esforço notável no sentido de aumentar a ductilidade, a resistência a acções mecânicas, de impacto e de fadiga, bem como a durabilidade dos materiais de matriz cimentícia, em especial pela introdução de fibras. Estes materiais, cuja resistência última à tracção e flexão pode ser várias vezes superior à resistência da matriz, e apresentar deformação última muito superior à deformação de início da fendilhação da matriz, são designados por materiais de matriz cimentícia reforçados com fibras (FRC – Fibre Reinforced Concrete).

Por seu lado, nas duas últimas décadas o uso de materiais de matriz polimérica reforçada com fibras contínuas (FRP – Fibre Reinforced Polymers) tem aumentado significativamente na indústria da construção Civil, devido, fundamentalmente, à sua aplicação no reforço de estruturas de betão, e na construção de perfis e sistemas estruturais, principalmente segundo a técnica da pultrusão.

Enquanto os FRC apresentam elevada resistência à compressão, rigidez e ductilidade, mas limitada resistência à tração pré- e pós-fendilhação, limitada protecção à corrosão das armaduras de aço de construção, e relativa elevada massa específica, os FRP têm elevada resistência à tracção, relativa baixa massa específica, são imunes a fenómenos de corrosão, mas têm moderada resistência à compressão, são susceptíveis a fenómenos de instabilidade e à acção de temperaturas elevadas, e têm relativa baixa rigidez e apresentam rotura frágil.

No entanto, os FRCs e os FRPs podem ser devidamente combinados, extraindo o que de melhor cada um pode contribuir, no sentido de constituírem sistemas estruturais leves, duráveis, de elevada resistência e ductilidade. A correcta combinação destes materiais também pode ser efectuada no desenvolvimento de novos sistemas para o reforço de estruturas. Este projecto científico pretende definir uma estratégia que engloba o ensino, a investigação e a aplicação destes materiais, num contexto mais alargado da construção e reabilitação sustentável.

2 ESTADO DE ARTE

Os pavimentos de edifícios industriais foram as primeiras grandes aplicações de FRC, onde a substituição das armaduras convencionais por fibras de aço revelou-se técnica e economicamente vantajosa [1], sendo possível construir pavimentos sem juntas de controlo de fendilhação e com panos que podem alcançar os 1000 m² [2]. Neste tipo de aplicação as fibras sintéticas de baixo módulo de elasticidade têm sido utilizadas basicamente para controlo de fendilhação por retração plástica. No entanto, nas duas últimas décadas têm-se assistido ao desenvolvimento de fibras sintéticas de maior

módulo, o que, a par do surgimento de super-plastificantes de última geração, têm contribuído para melhorar significativamente as propriedades em estado fresco e endurecido dos FRCs. De facto, no final do século passado surgiram os primeiros estudos e aplicações de betão auto-compactável reforçado com fibras (FRSCC) [3] e, mais recentemente, têm sido desenvolvidos betões ultrafluidos reforçados com mais do que um tipo de fibras [4]. A utilização de mais do que um tipo de fibras revela ser uma estratégia adequada no sentido de maximizar e potenciar os mecanismos de reforço de cada tipo de fibra aplicado. Desta forma é possível obter FRCs com resistência última à tracção superior à resistência da matriz, apresentando padrão de fendilhação difuso, com abertura máxima de fissura inferior aos limites recomendados para aplicações estruturais até níveis de deformação de tracção de cerca de 2% [5]. Estes materiais, designados na bibliografia inglesa por “Strain Hardening - Fibre Reinforced Cement Composites (SH-FRC)”, podem ter imensas aplicações estruturais, principalmente na indústria da pré-fabricação.

Por sua vez os FRPs têm sido utilizados, fundamentalmente, no reforço à flexão de vigas [6] e lajes [7] de betão armado (BA), no reforço ao corte de vigas de BA [8], no confinamento de pilares de BA [9] e no reforço sísmico de pilares de BA [10]. Os FRPs também têm sido bastante utilizados no reforço de estruturas de alvenaria [11]. Os FRPs podem ser aplicados nas faces dos elementos a reforçar (Externally Bonded Reinforcement, EBR) ou introduzidos no betão de recobrimento (Near Surface Mounted, NSM) [12, 13]. Mais recentemente tem-se assistido ao fabrico de varões e redes em FRP para a substituição de armaduras de aço no reforço de estruturas de betão [14]. Dado o relativo menor módulo de elasticidade e maior resistência à tracção destes varões, quando se toma por base de comparação as propriedades do aço de construção, a aplicação de varões de FRP [15], laminados de FRP segundo a técnica NSM [16] e segundo a técnica EBR [17], sob pretensão, permite mobilizar eficazmente o seu potencial de reforço.

Os perfis de FRP, principalmente em fibra de vidro (GFRP) e fabricados segundo a técnica da pultrusão, podem ser ligados a finas camadas de FRC para constituírem sistemas estruturais relativamente leves, com propriedades de resistência e rigidez que permitem cumprir as exigências dos estados limites de utilização e últimos, com custos inferiores de manutenção e com maior ciclo de vida [18, 19]. A assemblagem de finas camadas de FRC com sistemas de FRP fabricados segundo a técnica de vacuum permite a construção de painéis e lajes segundo o conceito sanduíche, quer para a construção nova [20], como para a reabilitação do património construído [21]. Além da leveza, elevada rigidez, resistência e ductilidade, o conforto térmico que estes sistemas estruturais garantem é bastante superior aos sistemas estruturais convencionais, pois são eliminadas as pontes térmicas [22].

3 ESTRATÉGIA DE IMPLEMENTAÇÃO

A estratégia de implementação da área científica em apreço passa por três vertentes: investigação; ensino; transferência de conhecimento e tecnologia.

3.1 Investigação

As principais linhas de investigação são as seguintes:

1. Vigas e lajes em FRC pré-fabricadas e pré-tencionadas em reforço misto aço-FRP;
2. Painéis e lajes sanduíche pré-fabricados e constituídos por camadas exteriores em FRC ligadas por perfis de FRP;
3. Técnicas de reforço baseadas em painéis de SH-FRC reforçados com sistemas de FRP

Todas as linhas incorporam investigação experimental, analítica e numérica. A investigação experimental permite caracterizar o comportamento de cada material e o comportamento dos sistemas estruturais compósitos. A investigação analítica tem como objectivo o estabelecimento de regras de dimensionamento e projecto, enquanto a investigação numérica é utilizada para aumentar as potencialidades do programa computacional FEMIX, de que o autor do presente projeto científico é cofundador. Da investigação experimental resultarão novos modelos constitutivos para caracterização do comportamento dos materiais intervenientes, os quais serão implementados no FEMIX. Por sua vez o FEMIX será utilizado para, por intermédio de estudos paramétricos, calibrar e validar as formulações analíticas.

3.1.1 *Vigas e lajes em FRC pré-fabricadas e pré-tensionadas em reforço misto aço-FRP*

Nesta linha de investigação exploram-se os benefícios do reforço misto constituído por varões de FRP e de aço, aplicados sob determinada pré-tensão, sendo os estribos suprimidos pela utilização de FRC. A opção por varões de FRP deve-se ao facto de serem mais resistentes que os seus homólogos em aço, e serem imunes a fenómenos de corrosão. No entanto, além do menor módulo de elasticidade, os varões de FRP têm um comportamento iminente linear e elástico com rotura frágil, pelo que o seu uso exclusivo no reforço de estruturas de betão pode comprometer a capacidade da estrutura desenvolver rotura dúctil. A combinação de varões de FRP e de aço tem todo o potencial para constituir uma solução de reforço de reduzida susceptibilidade a fenómenos de corrosão, e apresentar

elevado desempenho estrutural. Para tal os FRPs são colocados com o menor recobrimento de betão possível permitido por questões de aderência FRP-betão, e os varões longitudinais de aço são colocados acima dos varões de FRP, com uma camada de betão de recobrimento de pelo menos 60 mm (Fig. 1). A percentagem de varões de aço é a necessária para que, caso a capacidade de reforço dos FRPs seja perdida pela acção de um fogo, a estrutura tenha ainda reforço suficiente para suportar as acções quase permanentes.

A resistência ao corte destes elementos estruturais é garantida por FRC de elevada resistência, pois a elevada compacidade associada a betões de elevada resistência, além de oferecer maior proteção e aderência às armaduras longitudinais, permite mobilizar mais eficazmente os mecanismos de reforço das fibras. Quer os varões de FRP como os de aço são aplicados sob determinada pré-tensão, pois desta forma aumenta-se a resistência ao corte destes elementos pré-fabricados.

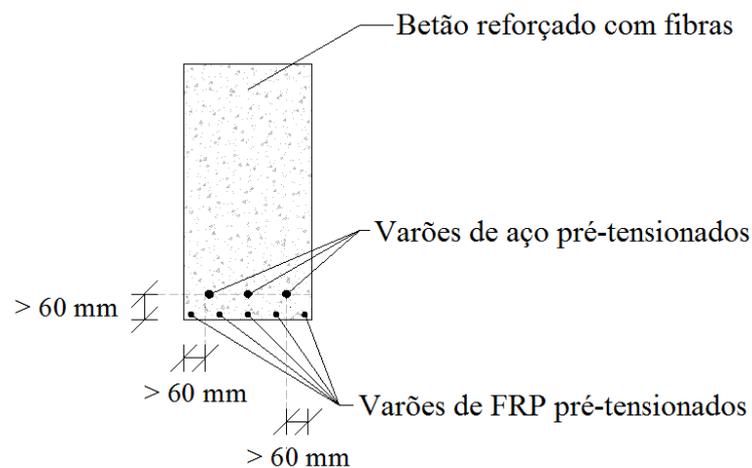


Fig. 1 – Conceito de reforço híbrido para vigas e lajes pré-fabricadas em FRC.

3.1.2 Painéis e lajes sanduíche pré-fabricados e constituídos por camadas exteriores em FRC ligadas por perfis de FRP

Pretende-se desenvolver um conceito de painel sanduíche constituído por finas camadas externas em FRSCC, ligadas por conectores de FRP. As propriedades reológicas, diferidas e de durabilidade do FRSCC serão investigadas, sendo dada especial atenção ao comportamento da ligação entre o FRSCC e os conectores de FRP. Estes sistemas estruturais podem ser utilizados na construção de edifícios modulares pré-fabricados.

Também se pretende desenvolver painéis sanduíche inovadores em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) para a reabilitação de pisos e fachadas degradados do património construído. Os painéis sanduíche a desenvolver incluem uma espuma de poliuretano no seu núcleo, e incorporam dois tipos inovadores de reforço: (i) uma rede 3D de costuras em GFRP a ligar as camadas externas; e (ii) uma grelha de lâminas em GFRP. É expectável que ambas as soluções aumentem a rigidez e resistência ao corte da camada de enchimento, aumentando também a resistência à encurvadura da lâmina superior. As lâminas em GFRP serão produzidas através da técnica de infusão por vácuo, que garante uma melhor homogeneidade e custos de fabrico mais reduzidos, por comparação com técnicas tradicionais. Também será desenvolvida uma solução inovadora híbrida GFRP-(SH-FRC), com uma lâmina de GFRP na face inferior tracionada, e uma camada de SH-FRC na face superior comprimida, evitando a ocorrência de fenómenos de instabilidade, garantindo um comportamento dúctil e permitindo a fácil aplicação de materiais de revestimento de piso ou fachada.

3.1.3 Técnicas de reforço baseadas em painéis de SH-FRC reforçados com sistemas de FRP

Pretende-se desenvolver a técnica de reforço esquematicamente descrita nas Figs. 2a e 3, a qual permite aumentar significativamente a resistência à flexão (Fig. 4), ao corte (Fig. 5), e a capacidade de dissipação de energia de estruturas de betão (Fig. 6).

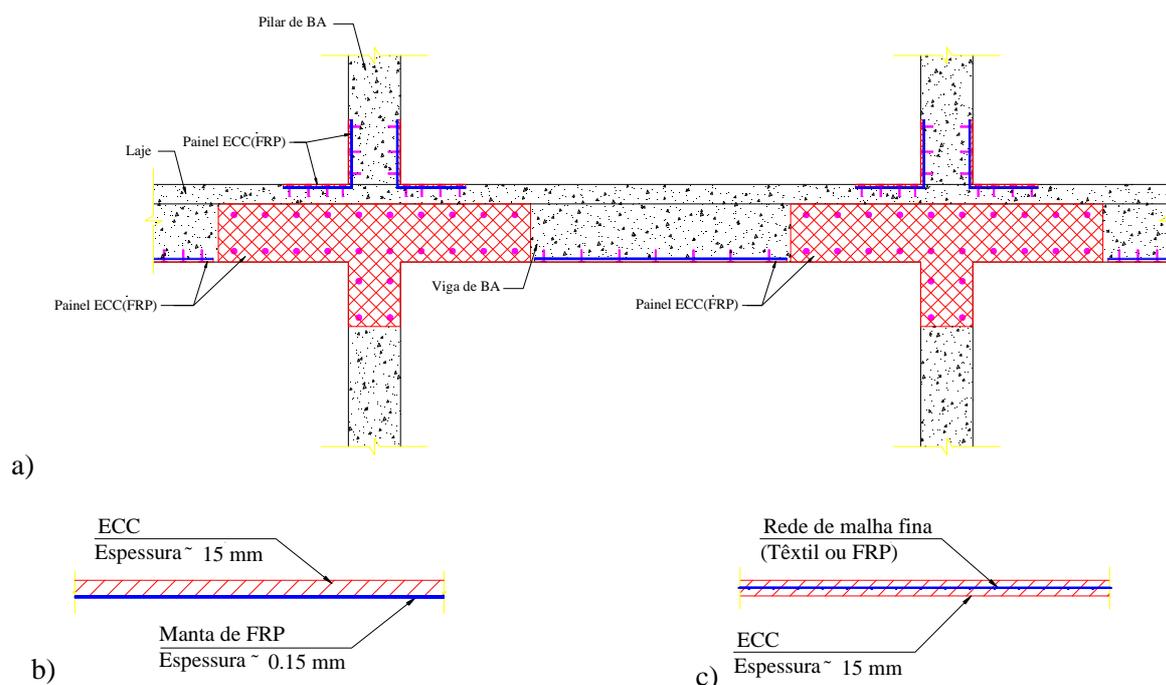


Fig. 2 - Painel de ECC(FRP) para o reforço de pórtico de BA

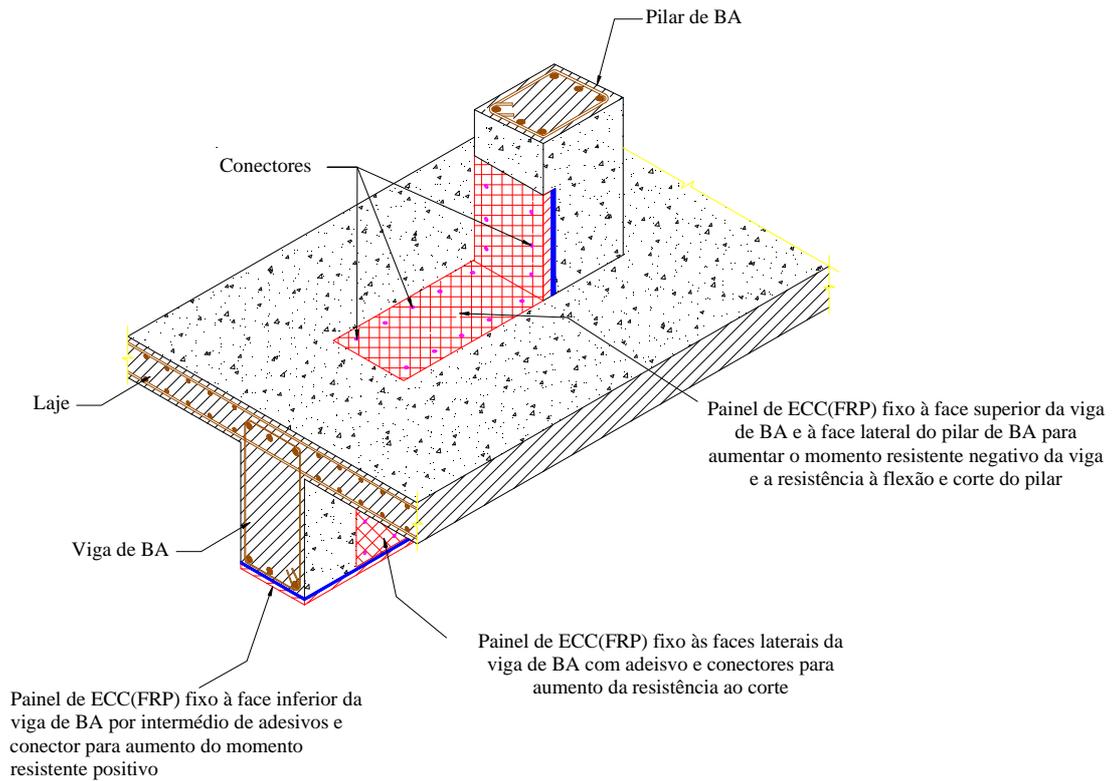


Fig. 3 - Detalhe de aplicação de painel de ECC(FRP)

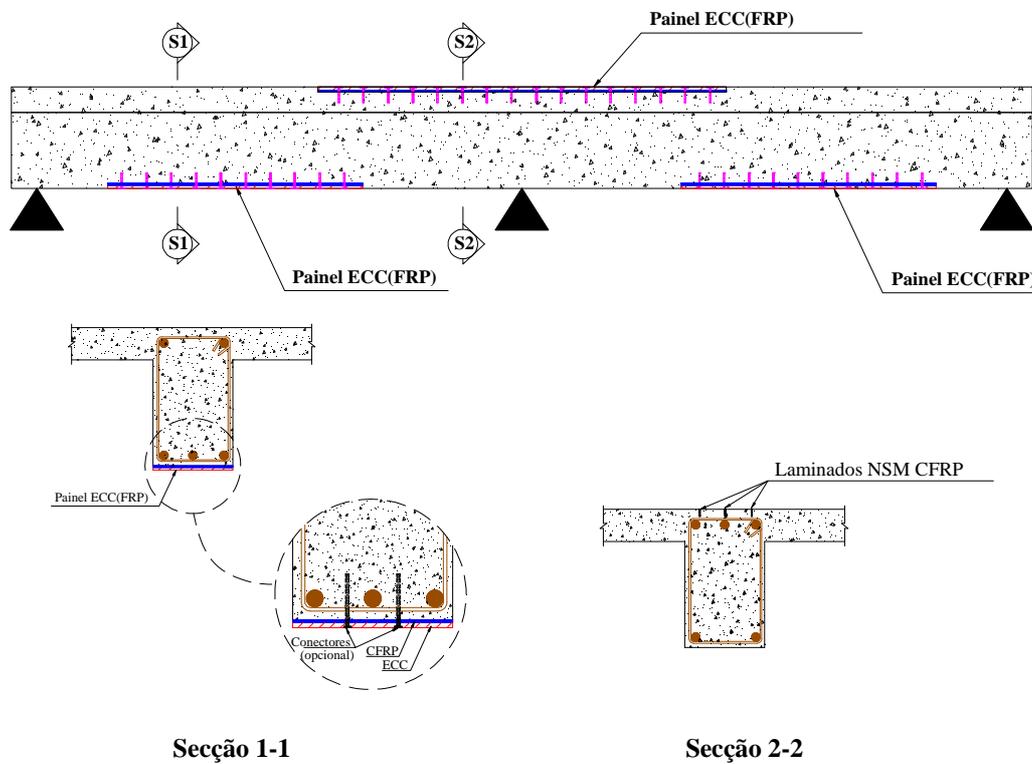
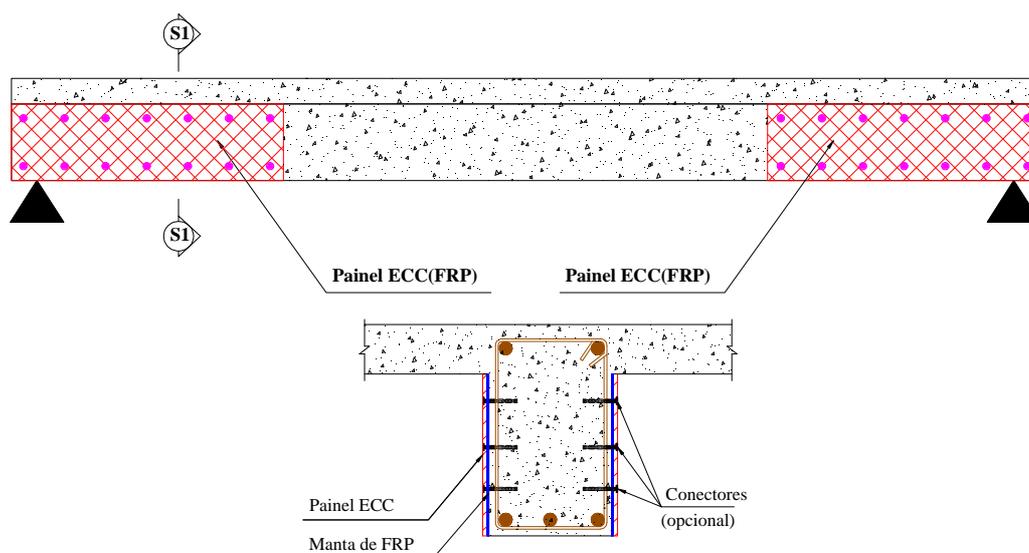


Fig. 4 - Técnica de reforço à flexão de vigas utilizando painéis de ECC(FRC).



Secção 1-1

Fig. 5 - Técnica de reforço ao corte de vigas de BA utilizando painéis de ECC(FRP).

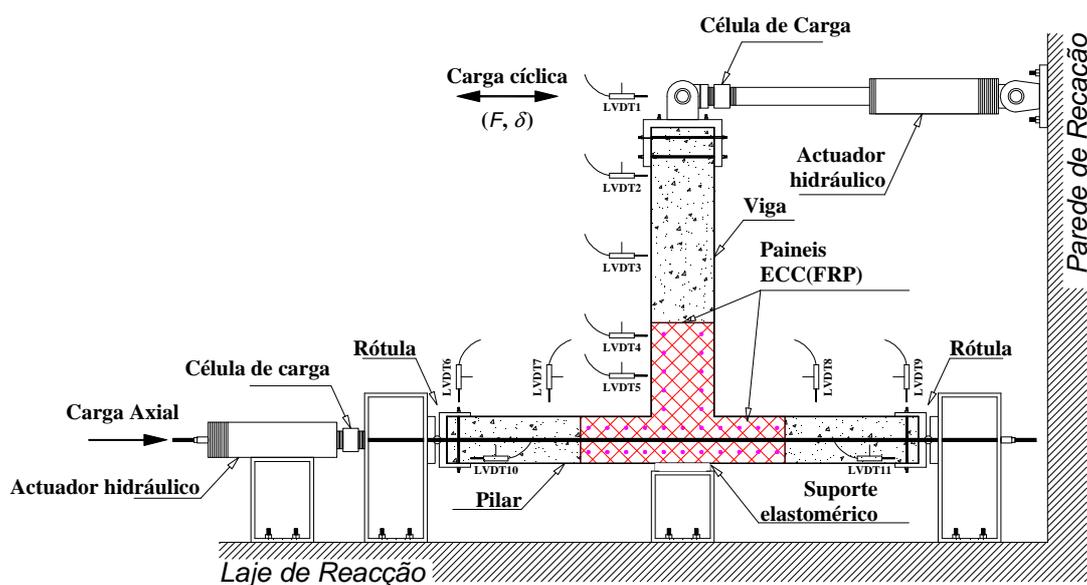


Fig. 6 - Painéis de ECC(FRP) no aumento da capacidade de dissipação de energia da ligação nó-pilar (reforço sísmico).

Esta técnica baseia-se na utilização de finos painéis pré-fabricados de argamassa reforçada com elevada percentagem de fibras discretas (ECC, da família dos SH-FRC), os quais são reforçados, na sua face interna, com uma manta de FRP colada com epóxi (Fig. 2b), ou reforçados no seu folheto médio com uma rede de fibras têxtil ou de FRP (Fig. 2c). O ECC deverá apresentar uma resistência

superior à de início da fendilhação da matriz até um nível de extensão superior a 1.5%, com abertura de fissura inferior a 0.3 mm, pelo que a combinação do ECC com os FRPs permite o fabrico de painéis com elevada ductilidade e resistência (Fig. 7).

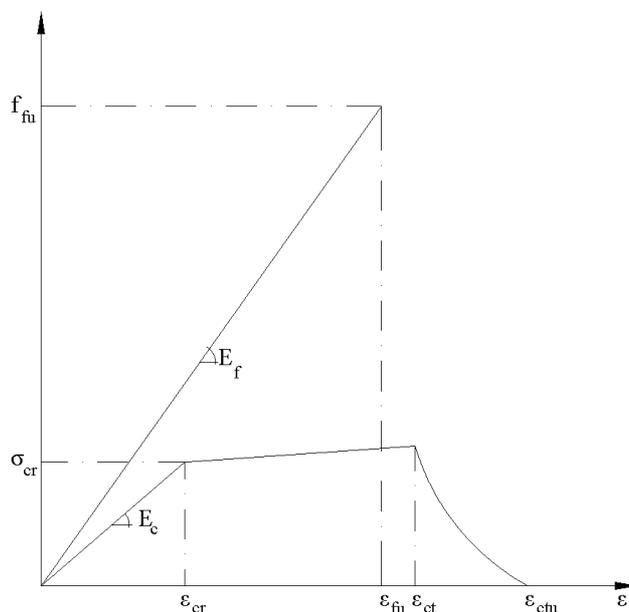


Fig. 7 - Relação tensão-extensão de FRP (subíndice *f*) e ECC (subíndice *c*) (sem escala)

O painel pode ser fixo ao betão das peças a reforçar por meio de fixações metálicas. Comparativamente com a solução de reforço em chapas de aço, os painéis de ECC(FRP) são mais leves, globalmente mais económicos e são imunes à corrosão. Dado que o painel terá uma espessura de cerca de 15 mm, ele pode ser instalado no espaço reservado ao recobrimento das armaduras. O ECC oferecerá protecção aos seus constituintes de FRP no que diz respeito à ação do fogo, a actos de vandalismo, bem como protecção às armaduras e betão da peça a reforçar em relação à acção de agentes de agressividade ambiental. Dado o excelente acabamento que pode ser conseguido ao nível das suas superfícies, estes painéis não necessitam de qualquer acabamento após a sua aplicação.

A continuidade do painel de reforço na ligação viga-pilar é assegurada da forma representada na Fig. 8. O gradiente de tensões que se desenvolve na ligação entre as duas partes do painel é suportado pela utilização de um maior número de camadas de FRP nessa zona de transição (Fig. 8). Um significativo acréscimo de resistência e ductilidade pode ser garantido nas zonas superior e inferior dos pilares por intermédio do envolvimento destas zonas com camadas de FRP, sobre as quais se aplicam os painéis de ECC(FRP), Fig. 9.

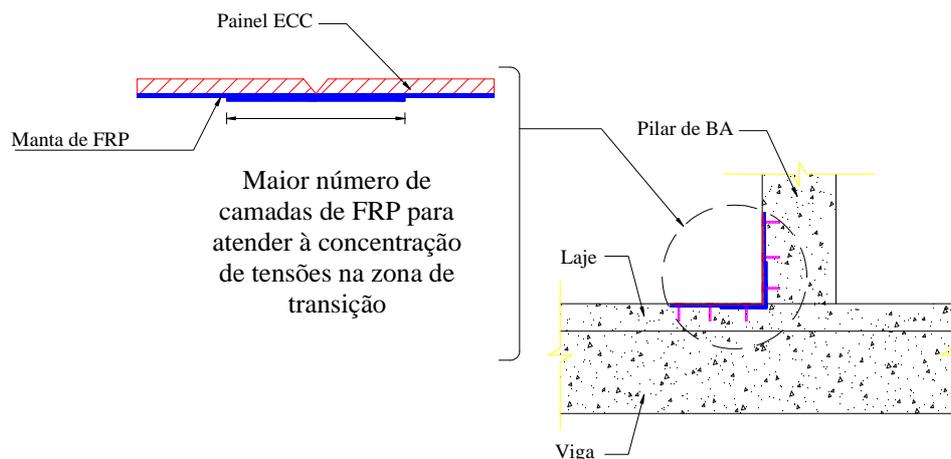


Fig. 8 - Painel ECC(FRP) para o reforço da ligação pilar-viga.

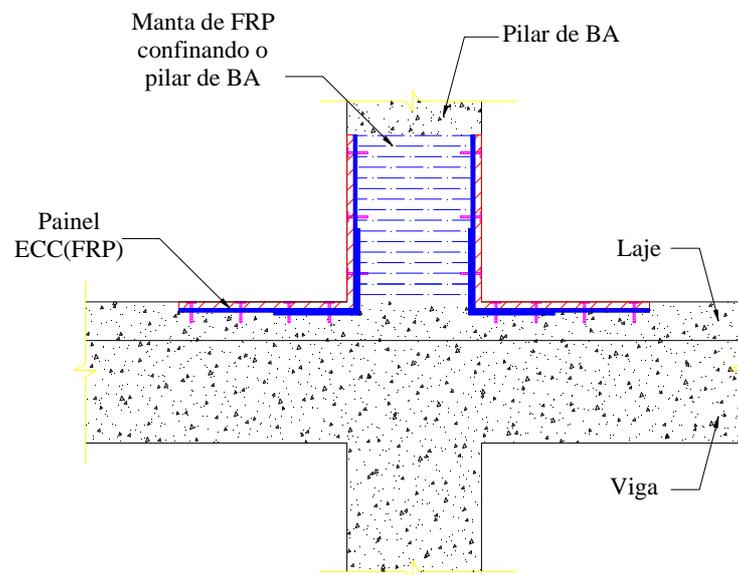


Fig. 9. Painel de ECC(FRP) para o confinamento do betão das extremidades do pilar.

3.2 Ensino

No segundo e terceiro ciclos do curso de Engenharia Civil será proposta a disciplina: FRC e FRP na inovação estrutural. Esta disciplina é composta pelos seguintes módulos: 1) Materiais de matriz cimentícia reforçados com fibras, 1.1) Tecnologia; 1.2) Propriedades em fresco; 1.3) Propriedades mecânicas; 1.4) Durabilidade; 1.5) Modelos de dimensionamento para projecto de estruturas de FRC; 2) Materiais compósitos; 2.1) Técnicas de fabrico; 2.2) Propriedades mecânicas; 2.3) Durabilidade; 2.4) Modelos de dimensionamento para projecto de estruturas em FRP; 2.5) Modelos de dimensionamento para projecto de reforço de estruturas de BA com FRP; 3) Estruturas compósitas



FRC-FRP; 3.1) Comportamento de ligações FRC-FRP; 3.2) Modelos de dimensionamento; 3.3) Execução, controlo de qualidade e monitorização.

3.3 Transferência de conhecimento e tecnologia

A implementação da investigação realizada e a transferência dos conhecimentos adquiridos para o tecido industrial passa pela criação de um protocolo com empresas ligadas ao fabrico de fibras, fabrico de sistemas e perfis de FRP, e de empresas de pré-fabricação de elementos estruturais para a indústria de pré-fabricação, no sentido de colaborarem em cursos de Mestrado e de Doutoramento com propostas de temas no âmbito do uso de FRC e FRP no contexto da inovação estrutural, bem como na colaboração de orientação da investigação a ser desenvolvida ao abrigo das correspondentes teses.

4 RESULTADOS ESPERADOS

Com este projecto científico pretende-se: 1) contribuir para o desenvolvimento de sistemas estruturais e técnicas de reforço estrutural mais competitivos e sustentáveis, auxiliando as empresas do setor da construção e reabilitação a tornarem-se mais competitivas; 2) Aumentar os níveis de competência que o grupo de investigação já detém a nível nacional e internacional nas áreas dos FRCs e FRPs, atraindo a atenção de empresas de escala global para parcerias no âmbito da inovação estrutural pela utilização racional e otimizada destes materiais; constituir a génese de um curso de Doutoramento Internacional designado (“Advanced Materials for Innovative Structures – AMIS”) - neste contexto o autor deste projecto científico tem tido o incentivo de colegas de diversas universidades Europeias e da América do Norte no sentido de liderar esse curso, sendo o título acima indicado a primeira proposta do autor; 3) Gerar conhecimento que contribua para a elaboração dos documentos técnicos e científicos dos grupos de trabalho internacionais de que o signatário é membro, em especial: ACI 544-FRC, ACI 440-FRP; fib TG 8.3-FRC; fib TG 9.3-FRP; 4) Atrair alguns dos melhores alunos formados em reputadas Universidades Nacionais e Internacionais; 5) Aumentar a qualidade e quantidade de publicações em revistas ISI; 6) Contribuir para o aumento do reconhecimento Nacional e Internacional do ISISE, do DEC e da UM.



5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACI 544.1R-96, State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute, 66 pp., 1997.
- [2] ACI 544 3R-08 Guide for Specifying, Proportioning and Production of Fiber-Reinforced Concrete, 2008.
- [3] Groth, P. and Nemegeer, D. (1999). The Use of Steel Fibres in Self-Compacting Concrete. Proceedings 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Stockholm, Sweden), A. Skarendahl and Ö. Petersson (editors), RILEM Publications S.A.R.L, 497-508.
- [4] Stähli, P., “Ultra-fluid, oriented hybrid-fibre-concrete”, PhD Thesis, ETH, Zürich, Switzerland, 2008.
- [5] Pereira, E.N.B.; Fischer, G.; Barros, J.A.O., “Hybrid fiber reinforcement and crack formation in cementitious composite materials”, aceite para publicação no High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Ann Arbor, Michigan, USA, 20-22 June 2011.
- [6] Barros, J.A.O., Fortes, A.S., “Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits”, Journal Cement and Concrete Composites, 27(4), 471-480, 2005.
- [7] Bonaldo, E.; Barros, J.A.O., Lourenço, P.J.B., “Efficient strengthening technique to increase the flexural resistance of existing RC slabs”, Journal of Composites for Construction 12(2), 149-159, March/April 2008.
- [8] Dias, S.J.E.; Barros, J.A.O., “Experimental behaviour of RC beams shear strengthened with NSM CFRP laminates”, Strain International Journal, doi: 10.1111/j.1475-1305.2010.00801.x, 2011.
- [9] Barros, J.A.O.; Ferreira, D.R.S.M., “Assessing the efficiency of CFRP discrete confinement systems for concrete column elements”, Journal of Composites for Construction 12(2), 134-148, March/April 2008.
- [10] Perrone, M., Barros, J.A.O., Aprile, A., “CFRP-based strengthening technique to increase the flexural and energy dissipation capacities of RC columns”, ASCE Journal of Composites for Construction, 13(5), 372-383, October 2009.
- [11] Hamilton III, H.R., and Dolan, C.W., “Flexural Capacity of Glass FRP Strengthened Concrete Masonry Walls,” Journal of Composites for Construction, ASCE, 5(3),170-178, 2001.
- [12] ACI Committee 440, “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”, American Concrete Institute, 118 p, 2007.
- [13] FIB - Bulletin 14, “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”, Technical report by Task Group 9.3 FRP, 130 p, 2001.



- [14] FRP reinforcement in RC structures, fib bulletin technical report on the “Design and use of fibre reinforced polymer reinforcement (FRP) in reinforced concrete structures”, September 2007.
- [15] Fico, R.; Galati, N.; Prota, A.; Nanni, A., “Design and construction of a bridge deck using mild and post-tensioned FRP bars”, 7th International Symposium Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforced for Concrete Structures, SP-230-63, 2005.
- [16] Barros, J.A.O., “NSM Post-tensioned CFRP laminates for the flexural strengthening of RC beams”, 9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Sydney, Australia, Paper 85, 13-15 July, 2009.
- [17] Barros, J.A.O.; Lourenço, L.A.P.; Silva, P.; Rosado, M., “Laminados de CFRP pós-tensionados no reforço à flexão de lajes de betão armado com excessiva deformabilidade”, Reabilitar 2010, Encontro Nacional Conservação e Reabilitação de Estruturas, LNEC, Artigo Com_012, 23-25 Junho 2010.
- [18] Correia, J.R., “GFRP pultruded profiles in civil engineering: hybrid solutions, bonded connections and fire behaviour”, PhD Thesis, IST, 2008.
- [19] Mendes, J.D.; Barros, J.A.O.; Sena-Cruz, J.M.; Taheri, M., “Development of a pedestrian bridge with GFRP profiles and fibre reinforced self-compacting concrete deck”, Composite Structures Journal, 10.1016/j.compstruct.2011.05.005, 2011.
- [20] Rizkalla, S.H. & Dawood, M. 2009, “Advances on the Use of FRP for the Precast Concrete Industry”, FRPRCS-9. Sydney, Australia.
- [21] Correia, J.R.; Ferreira, J.; Branco, F.A., “A rehabilitation study of sandwich GRC facade panels” Construction and Building Materials, 20(8), 554-561, 2006.
- [22] Lameiras, M.R.; Santos T.; Azenha, M.A.D.; Barros, J.A.O., “Comportamento térmico de painéis sanduíche constituídos por lâminas em betão e conectores de compósito de polímero reforçado com fibras”, Technical report 10-DEC/E-27, Dep. Civil Eng., School Eng. University of Minho, 73 pp., October 2010.