

Reforço de estruturas com malhas abertas de fibra de carbono e projeção de concreto ou argamassas minerais

FILIPE DOURADO – CHIEF EXECUTIVE OFFICER, SEIXAL
S&P CLEVER REINFORCEMENT IBERICA

1. INTRODUÇÃO

Existem diferentes métodos de reforço de estruturas de concreto armado: adição de novos elementos, pilares e vigas; instalação de vigas metálicas; adição de armaduras de aço e concreto projetado; colagem exterior de chapas de aço ou FRP (Fibre Reinforced Polymer) etc.

Os sistemas FRP, em forma de mantas, tecidos ou laminados pré-fabricados, podem ser colados e fixados aos

elementos estruturais usando adesivos certificados. Existem diversas normas e guias de cálculo de vários países sobre o reforço externo com FRP.

Esses novos métodos de reforço são o estado da arte mundial e estabeleceram, nos últimos 15 anos, um método de reforço fiável, durável e de custo-benefício vantajoso para o pós-reforço de estruturas existentes. Ultimamente, têm-se desenvolvido novos materiais de reforço em FRP ou novos métodos de aplicação, como é o caso dos compósitos pré-esforçados. Neste artigo, apresenta-se uma evolução relativamente

Quadro 1 – Características gerais de malhas de reforço

Dados técnicos	Malha L500	Malha L200 (long. direção principal) Malha C200 (tran. direção principal) Malha 200/200 (duas direções)
Módulo elástico (teórico) [kN/mm ²]	240	240
Fator de redução do módulo elástico devido à aplicação	1.5	1.5
Módulo elástico (reduzido) para o cálculo [kN/mm ²]	160	160
Resistência última à tração C-fibra (teor.) [N/mm ²]	4'300	4'300
Gramagem da C-fibra na direção principal [g/m ²]	200	80 (2x80 para a 200/200)
Densidade C-fibra [g/cm ³]	1.7	1.7
Alongamento de rotura (teórica) [%]	1.75	1.75
Espessura teórica da C-fibra para o cálculo (Peso ÷ densidade) [mm]	0.117	0.047
Seção transversal C-fibra para o cálculo [mm ² /m]	117	47
Tensão última a 1.75 % (teórica) [kN/m]	500	200
Tensão para o cálculo (recomendado)		
Flexão (~ 800 N/mm ²) (extensão limite em ELU 0.5 %)	93.6	37.6
[kN/m] Axial (~ 640 N/mm ²)	74.8	30.0
(extensão limite em ELU 0.4 %) [kN/m]		

Quadro 2 – Resumo comparativo entre sistemas colados FRP's e malhas de reforço coladas com concretos/argamassas minerais

	FRP System carbono com matriz epóxi	Malhas de carbono com matriz mineral
Umidade do suporte	< 4% umidade residual	Superfície deve estar saturada
Condições da base	Ligeiramente irregular (Lixagem ou jato de areia)	Irregular (jato de água ou areia)
Trabalhos de nivelamento	Trabalhoso nivelamento / reperfilamento	Sem trabalhos adicionais
Aplicação	Fácil / conveniente	Trabalhoso (espalhamento, recobrimento)
Considerações físicas	Clarificação necessária FRP atua como barreira de vapor	Não necessita de clarificação ARMO-System e permeável ao vapor
Proteção à corrosão das armaduras	São necessários trabalhos adicionais – Proteção das armaduras – Pintura de proteção entre o FRP	O valor de pH de 12 para ARMO-System Não necessita de proteção adicional. ARMO-System promove uma proteção alcalina para as armaduras internas.
Segurança contra incêndios	Os fatores de segurança em caso de incêndio devem ser verificados e, caso necessário, devem ser aplicadas medidas de proteção	A matriz (ARMO-crete) é resistente ao calor. F60 (60 minutos de resistência) a ca. 1 cm recobrimento ARMO-mesh

aos compósitos: as malhas abertas de fibra de carbono integradas numa matriz cimentícia, referenciando-se as suas principais vantagens relativamente aos sistemas colados com epóxi.

2. DESCRIÇÃO GERAL DAS MALHAS DE REFORÇO. COMPARAÇÃO COM OS SISTEMAS COLADOS COM EPÓXI

As malhas de reforço em fibra de carbono são sistemas de reforço constituídos pela armadura de reforço, no caso a fibra de carbono, e uma matriz que integra a malha, numa estrutura que tem uma dupla funcionalidade: a aderência da malha e a transferência de esforços entre cada uma das fibras que integram a malha. Essas malhas são constituídas por

filamentos individuais em fibra de carbono e outra de construção, que pode ser de fibra de carbono ou vidro, dependendo da necessidade de resistência em um ou dois sentidos, podendo, assim, apresentar fibras no sentido longitudinal, transversal ou em ambos. As malhas podem ter conteúdos de fibra na ordem de 80 a 500g/m², com módulos elásticos idênticos ao aço, permitindo uma versatilidade de soluções de reforço muito interessante, como veremos adiante.

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

Por comparação e para melhor se integrar como elemento de reforço em forma de armadura, essas ma-

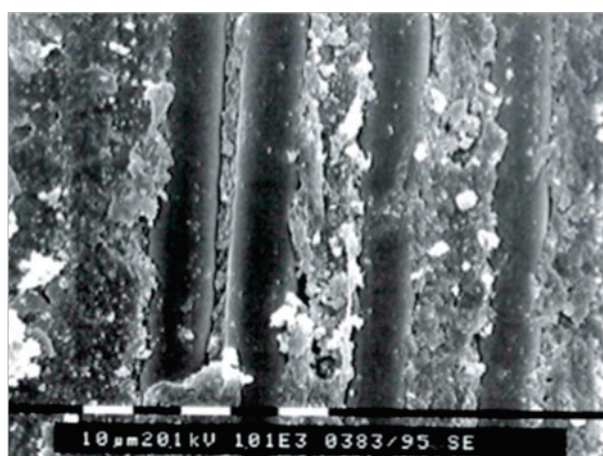
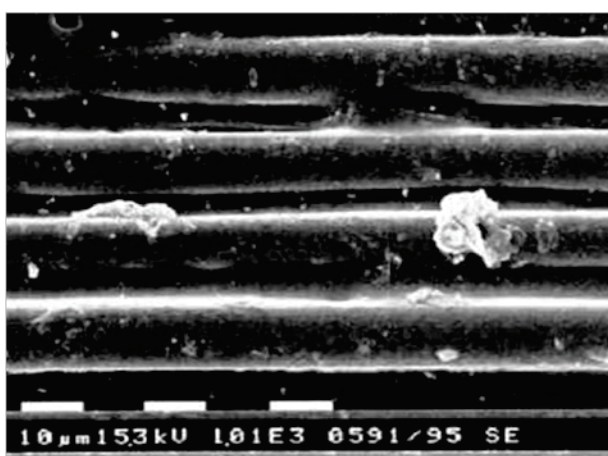


Figura 1 – Espectrografia comparativa entre uma malha normal e uma malha aditivada

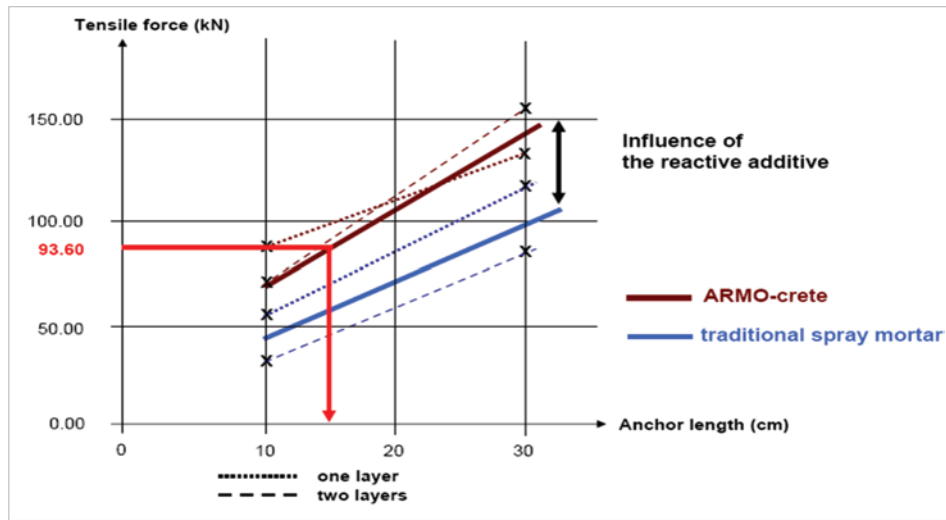


Figura 2 – Ensaio de amarração da malha de carbono/argamassas de reparação aditivada

As malhas apresentam módulos elásticos similares ao aço e resistências à tração muito superiores ao aço. Podem apresentar-se em rolos de 100 metros com larguras variáveis, o que facilita a sua aplicação. O Quadro 1 apresenta algumas características gerais deste tipo de malhas, onde se identifica o tipo, com a sua resistência à tração para o cálculo, tendo em conta uma determinada extensão para o cálculo.

2.2 COMPARAÇÃO COM OS SISTEMAS FRP'S COLADOS

As malhas de reforço em carbono apresentam al-

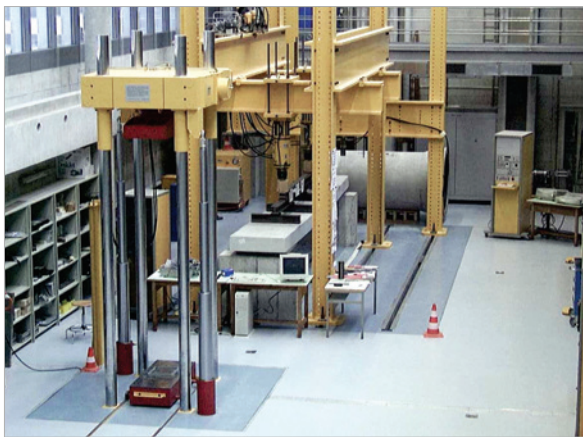


Figura 3 – Teste set-up da FH Fribourg

gumas vantagens muito interessantes relativamente aos sistemas colados com epóxi, destacando-se o fato da aderência da malha ser efetuada por um material mineral, exigindo um suporte úmido ou saturado de água. Como se sabe, os sistemas colados com epóxi exigem um substrato seco, segundo o Guideline CEB Fib 440, na ordem dos 3%. Ora, esse requisito é, muitas vezes, impossível de garantir, quer pelas

condições de aplicação, quer pela natureza das obras, como é o caso de túneis ou obras marítimas. Uma outra grande vantagem é o fato desses sistemas apresentarem uma resistência ao fogo perfeitamente caracterizada em ensaios. De fato, consegue-se facilmente provar que um reforço com malhas de carbono, executado com 2 cm de argamassa de reparação, oferece uma resistência ao fogo na ordem dos 120 minutos, o que é bastante aceitável para os parâmetros atuais exigidos neste tipo de intervenções estruturais, comparado com os sistemas colados, onde a resistência ao fogo é praticamente nula. Apresenta-se no quadro 2 um resumo das vantagens e desvantagens dos sistemas de FRP's em malhas e os colados.

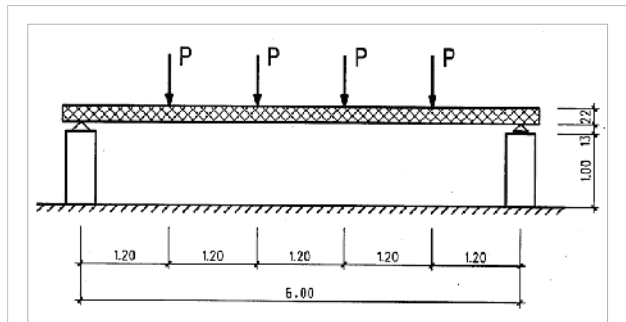


Figura 4 – Esquema do ensaio FH Fribourg

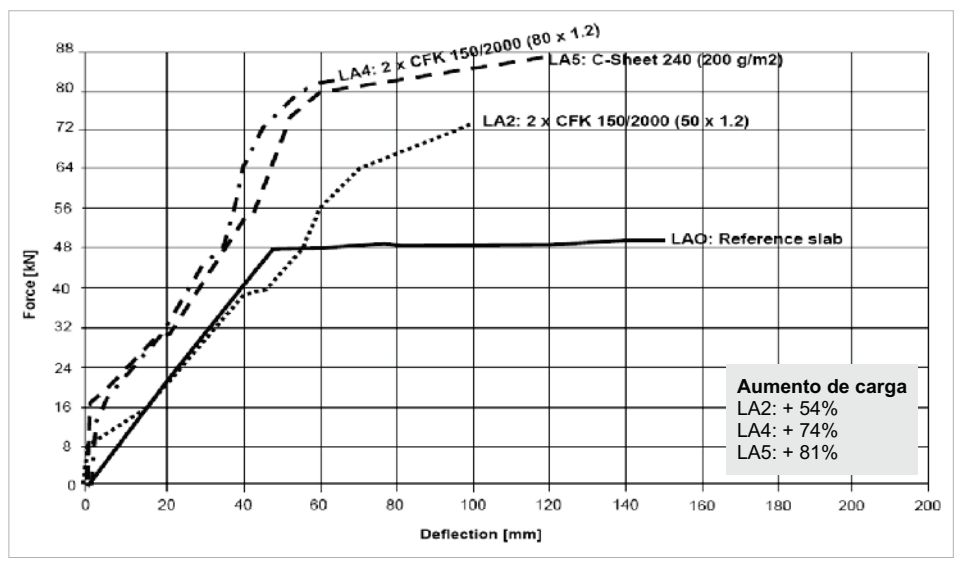


Figura 5 – Diagrama de carga/deflexão

3. VERIFICAÇÃO DA AMARRAÇÃO E ADERÊNCIA DAS MALHAS

Uma das questões que se coloca quando usamos malhas de fibra de carbono, sendo que a natureza da fibra não é propriamente compatível com produtos de base mineral, como as argamassas ou concretos, e: como se pode garantir uma aderência eficaz na transferência de esforços entre a matriz e as armaduras de reforço em fibra? De fato, é, no mínimo, questionável o desempenho das malhas num material de baixa aderência, como as argamassas cimentícias, quando comparamos com a das resinas epóxi, por exemplo. Uma série de ensaios realizados no Laboratório Federal para Ciência e Tecnologia de Materiais da Suíça (EMPA) verificou que, através do desenvolvimento de um revestimento da malha à base de silicato amorfo e de um aditivo na argamassa, conseguiu-se uma aderência melhorada da malha pela

formação de cristais de silicato de cálcio ao redor dos filamentos de fibra (figura 1).

A influência do componente reativo é claramente visível nos resultados. Se a malha L500 (malha que apresenta, para a tensão última a 1,75%, 500 kN/m) for usada sob esforços de flexão em situação de cálculo de 5‰ como extensão limite, é possível ancorar uma força 93,6 kN/m. O Quadro 3 exibe uma listagem dos comprimentos de ancoragem recomen-

dados, com um fator de segurança de 30%.

Foram realizados ensaios comparativos de verificação de comprimento de amarração entre malhas não revestidas e malhas revestidas em conjunto com argamassas aditivadas. Concluiu-se, com base nesses resultados, que com um comprimento de amarração de 15cm entre a malha e a argamassa (figura 2), obtem-se uma força de 93,6 kN, força essa que está na base dos cálculos estruturais para os estados limites últimos em flexão.

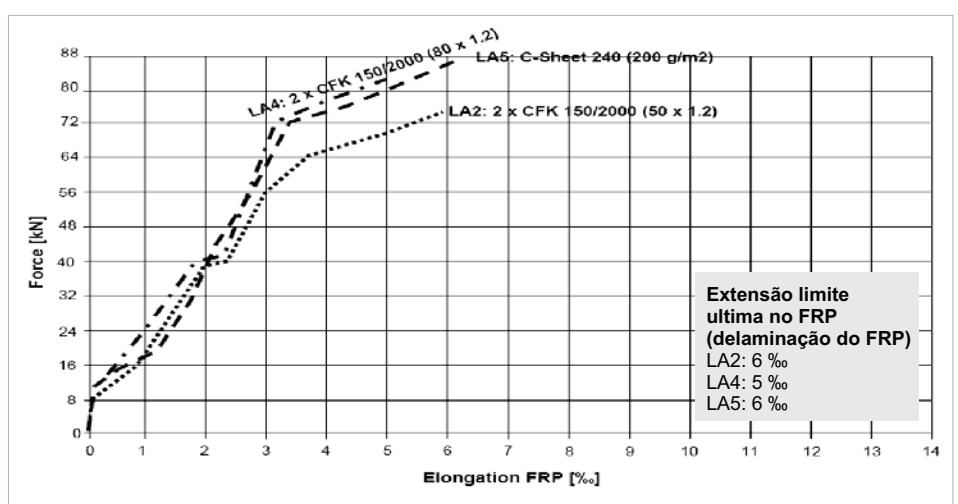


Figura 6 – Diagrama de carga/extensão do FRP a meio vão

Quadro 3 – Comprimentos de amarração para uma extensão de cálculo de 5%

Malha L500	c/ componente reativo (cm)		s/ componente reativo (cm)	
	Teste	Teste +30%	Teste	Teste +30%
Tensão de flexão (5%)	~15	~20	~28	~35-40

4. ENSAIOS DE DESEMPENHO

4.1 ENSAIOS DE FLEXÃO EM LAJES DE CONCRETO COM FRP'S COLADOS

Foram realizados ensaios na Universidade Técnica de



Figura 7 – Aplicação da argamassa como matriz

Fridbourg, na Suíça, em uma laje de concreto tipo, onde foram também realizados ensaios com laminados e mantas de fibra de carbono, de forma a comparar desempenhos estruturais. A laje de referência de concreto armado foi comparada com outras lajes de concreto armado reforçadas com diferentes sistemas de FRP.

Quadro 4 – Especificações da lajes de concreto armado

Laje	Armadura
Espessura 22 cm - Comprimento total 6.3 m	longitudinal 6 Ø 12 (S 500)
Largura 85 cm - vão entre apoios 6.0 m	transversal Ø 8 S = 150 (S 500)

Quadro 5 – Conteúdo de fibra de carbono

	Conteúdo C-fibre 0.85m largura
LA2: 2 Laminados 150/2000 (50 x 1.2)	84 mm ²
LA4: 2 x Laminados 150/2000 (80 x 1.2)	134.4 mm ²
LA5: Manta de 240 (200 g/m ²)	99.5 mm ²

4.1.1 Reforço com FRP

A laje de referência foi comparada com as lajes reforçadas com os diferentes sistemas de reforço - FRP Systems).

Os resultados são apresentados nas figuras 5 e 6.

4.2 ENSAIOS EM LAJES DE CONCRETO COM MALHA DE CARBONO EM MATRIZ CIMENTÍCIA

A laje de referência foi também comparada com as lajes reforçadas com malha de fibra de carbono L500.

As dimensões, as armaduras e o tipo de concreto usado nas lajes seguiram os padrões exatos

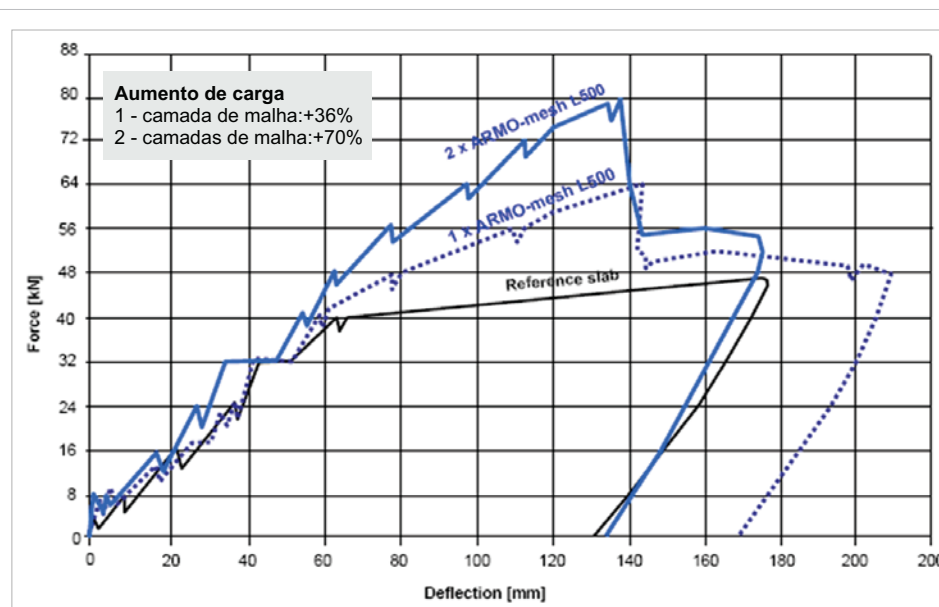


Figura 8 – Diagrama carga/deflexão

usados nas série de lajes reforçadas com o sistema FRP System, de forma a comparar os resultados.

4.2.1 Reforço da malha

A laje de referência foi comparada com laje reforçada com 1 camada com malha L500 e 2-camadas.

Consideram-se que as características técnicas da L500 estão de acordo com o Quadro 1.

A taxa de armadura efetiva:

- 1 camada de malha L500, com 99,5 mm² de fibra carbono em 0,85 m de largura de laje (aplicada com 1.5 cm argamassa estrutural);
- 2 camadas de malha L500, com 190 mm² de fibra de carbono em 0,85 m de largura de laje.

Foi medida a extensão da face no concreto (zona tracionada). Foi calculada a relação tensão/extensão na malha. Os resultados são apresentados nas figuras 8 e 9.

Foi medida a extensão da face no concreto (zona tracionada). Foi calculada a relação tensão/extensão no S&P ARMO-mesh. Os resultados são apresentados na Figura 9 (extensão e tensão no concreto no banzo comprimido).

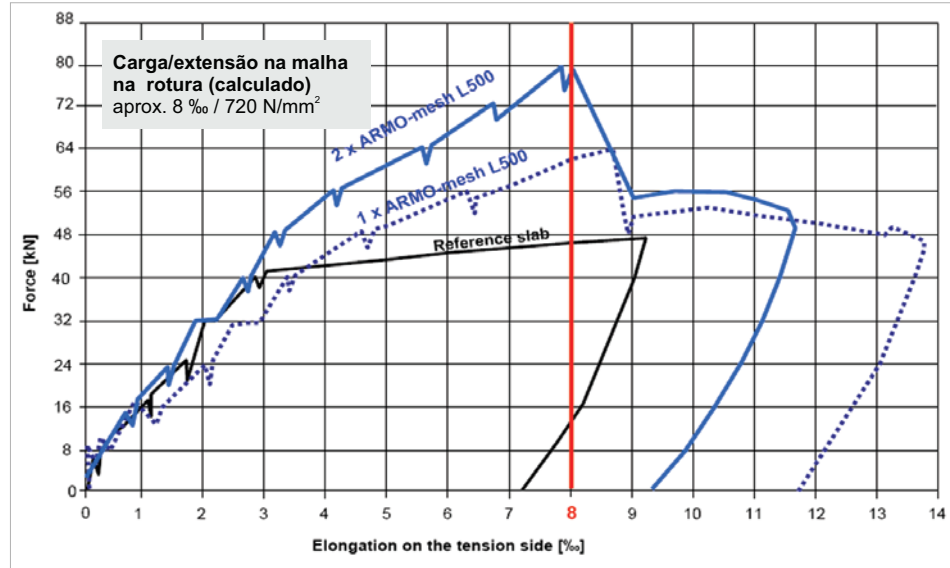


Figura 9 – Diagrama carga/Extensão medida a meio vão

No Quadro 6, compara-se o conteúdo de fibra de carbono e o fator de reforço relevante com FRP e Malhas de Carbono.

Recomenda os seguintes conceitos de cálculo para a malha de carbono, baseando-se na investigação da Universidade Técnica Fribourg/CH:

- Deve-se tomar um fator de redução de cálculo 1.5 sobre o módulo de elasticidade do material, devido à aplicação;
- Propõem-se considerar os seguintes limites de extensão em estados limites últimos (Quadro 7).

Quadro 6 – Conteúdo de fibra de carbono/aumento de carga FRP e malha

Série	Conteúdo de fibra-C	Fator de reforço
LA2: 2 x Laminados 150/2000 (50 x 1.2)	84 mm ²	+ 54%
LA4: 2 x laminados 150/2000 (80 x 1.2)	134.4 mm ²	+ 74%
LA5: Manta de 240 (200 g/m ²)	99.5 mm ²	+ 81%
1 – camada malha (aplicada em 1.5 cm argamassa)	99.5 mm ²	+ 36%
2 – camadas malha (aplicadas em 2 cm argamassa)	190 mm ²	+ 70%

Quadro 7 – Limites de extensão em estados limites últimos

Fator de redução do módulo de elasticidade	Módulo elástico (reduzido)	Limitação de extensão ELU		
		Reforço à flexão	Reforço axial (confinamento)	Reforço ao corte
1.5	160 kN/mm ²	0.5% (tensão 800 N/mm ²)	0.4% (tensão 640 N/mm ²)	0.2% (tensão 320 N/mm ²)



Figura 10 – Aplicação de malha de carbono em bancadas/ pormenor do reforço

5. DOIS CASOS PRÁTICOS DE APLICAÇÃO

5.1 REFORÇO DE BANCADAS NO ESTÁDIO MARACANÃ, NO RIO DE JANEIRO

O estádio do Maracanã sofreu uma série de intervenções de adaptação para o Campeonato Mundial de Futebol de 2014. Inicialmente, foi tido em conta algumas adaptações para reforços com fibras de carbono em vigas e pilares da estrutura de apoio à nova cobertura. No caso das bancadas, devido às exigências da FIFA, foi considerado inicialmente um reforço das bancadas com incremento de concreto e armaduras eletrosoldadas, com a finalidade de alterar os estados vibratórios da estrutura. Este projeto foi alterado, tendo em conta os prazos curtos de intervenção e o estado de degradação das bancadas. Foi, então, proposta pelo consultor de projeto a alteração do projeto inicial para armaduras em forma de malhas e enchimentos com microconcreto. Esta solução revelou-se de enorme utilidade, tendo encurtado os prazos em cerca de 3 meses.

5.2 REFORÇO DA ABÓBODA NUMA IGREJA EM LISBOA

Outra aplicação interessante do sistema pode ser o reforço de alvenarias em edifícios de valor histórico. A aplicação de novos materiais tem, muitas vezes, sido vetada por motivos de compatibilidade física entre os materiais. De fato, a utilização de reforços colados com resinas estruturais epóxi neste tipo de estruturas pode ser controversa devido à sua impermeabilidade ao vapor de água e à concentração de esforços em elementos de fraca aderência, como são as alvenarias antigas. As soluções de malha em fibra de carbono, por serem aderidas com argamassas de matriz mineral, apresentam-se como uma solução interessante do ponto de vista estrutural, sem comprometer os aspectos físicos das construções de valor histórico.

Uma primeira intervenção foi executada em 2012, no reforço de um arco em abóboda numa igreja em Lisboa. Esta construção apresentava uma anomalia devido ao deslocamento dos contrafortes, provocando uma desestabilização da abóboda. Foi efetuado um estudo de reforço da abóboda, tendo-se optado pelo refor-



Figura 11 – Aplicação de malha de carbono no intradorso da abóboda

ço com malhas de fibra de carbono no intradorso e extradorso da abóboda, utilizando argamassas de cal hidráulica como matriz. As duas “casca” de reforço foram depois conectadas com varões de inox, criando um efeito de confinamento da abóboda.

6. CONCLUSÕES

Os novos materiais de reforço, como são os FRP's, têm, cada vez mais, ocupado um espaço importante nas obras de reforço, quer em edifícios, quer em estruturas especiais, como são as pontes ou edifícios históricos. A sua versatilidade e utilidade, bem como os numerosos estudos e ensaios realizados nas duas últimas décadas,

além dos diversos manuais existentes, permitem encarar esses novos métodos de reforço com muita confiança. De fato, existem obra executadas há mais de 15 anos, com desempenhos muito satisfatórios. Novos materiais estão sendo desenvolvidos e aplicados em áreas interessantes, sendo este caso apresentado um exemplo disso. As malhas de carbono parecem vir preencher uma lacuna que sempre existiu nesses novos materiais, apresentando-se como uma solução muito interessante para alguns casos específicos de aplicação. Estão em curso investigações em Portugal e em laboratórios europeus, sendo muito promissores os resultados já obtidos.

Referências Bibliográficas

- [01] Prüfbericht Nr. 20100468A, S&P ARMO-mesh L500 (in eine Richtung, endverankert) Plattenbiegeversuch, 9.4.2010, VSH, CH.
- [02] Endverankerungen von S&P ARMO-mesh L500, Okt.-Dez. 2009, S&P Clever Reinforcement Company AG, CH.
- [03] Renforcement de dalles en beton au moyen de treillis en fibres de carbone (Projet de recherche AGP 14'105).
- [04] Projet de recherche AGP 21'159, Série expérimentale MR-A, Essais de cisaillement de murs en maçonnerie renforcés, janvier 2010, FH Fribourg, CH.
- [05] Projet de recherche AGP 21'159, Série expérimentale MR-B, Essais de cisaillement de murs en maçonnerie renforcés, mars 2010, FH Fribourg, CH.
- [06] Projet de recherche AGP 21'159, Série expérimentale MR-C, Essais de cisaillement de murs en maçonnerie renforcés, janvier 2010, FH Fribourg, CH (Version provisoire).
- [07] Prüfbericht Nr. 20101027 S&P ARMO-mesh 200/200 Plattenbiegeversuch, 7.5.2010, VSH, CH.
- [08] Prüfbericht Nr. 20093882A, S&P ARMO-mesh L500 (in eine Richtung) Plattenbiegeversuch, 9.4.2010, VSH, CH.
- [09] Flèches, déformations 05.11.2010. ●