



Utilização de armaduras não metálicas no Brasil

Luiz Octavio de Souza Bueno Oliveira¹, Regina Helena F. de Souza², Bruna de Almeida Carvalho Teixeira³

¹Doutorando, UERJ / Departamento de Estruturas e Fundações / luizoctavio.uerj@gmail.com

²Prof. Associado, UERJ/Departamento Estruturas e Fundações / reginahsouza@gmail.com

³Mestranda, UERJ / Departamento de Estruturas e Fundações / bcarvalho90@gmail.com

Resumo

Motivados pelo alcance de maior durabilidade em estruturas de concreto, a utilização de polímeros reforçados com fibra, FRP, se destaca como uma alternativa viável na construção civil. Dentre os produtos feitos com esta tecnologia, destacam-se as barras de armadura para estruturas de concreto. No âmbito mundial, estas barras são produzidas com fibras de vidro, aramida, carbono e, mais recentemente, basalto.

A proposta da utilização de armaduras não metálicas em estruturas de concreto armado está principalmente associada ao impedimento do processo de corrosão que a armadura tradicional, de aço, apresenta. Além disto, as armaduras não metálicas podem ser aplicadas em estruturas em que o baixo peso próprio ou a ausência de interferência eletromagnética possam ser características importantes. O grande desafio para o correto dimensionamento relaciona-se com o baixo módulo de elasticidade e a ruptura frágil.

Na construção civil, o Japão foi pioneiro na utilização de compósitos poliméricos reforçados com fibra, logo seguido pela China empregando-os sobretudo na construção de tabuleiros de pontes e obras subterrâneas. Na Europa, o uso das armaduras de FRP teve início na Alemanha com a construção de uma ponte rodoviária protendida em 1986 e o desenvolvimento de um vasto programa de pesquisa. No Canadá foram construídas várias pontes e passarelas no final da década de 90, fomentando o desenvolvimento de normas como a CSA S807, seguida pelas americanas ACI 440 e ASTM D4475, dentre outras. Nos Estados Unidos, a utilização das barras de FRP tem ocorrido em obras marítimas, em lajes de tabuleiro de pontes e em elementos pré-moldados.

No presente trabalho são abordadas a revisão bibliográfica recente no assunto, as principais características mecânicas das barras e sua influência no comportamento global de estruturas bem como são apresentados alguns dos resultados experimentais e analíticos que vêm sendo desenvolvidos pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em conjunto com o Instituto Militar de Engenharia.

Palavras-chave

Concreto armado, GFRP, Fibra de Vidro, Durabilidade

Introdução

Estruturas de concreto armado ou protendido são em geral bastante duráveis – desde que sejam bem planejadas, dimensionadas e executadas. E que durante a fase de operação, sejam vistoriadas, mantidas e reparadas, quando necessário. Contudo, há certos tipos de estruturas que, pelo ambiente em que estão inseridas, possuem um risco maior de serem afetadas por agentes agressivos e apresentarem patologias severas e comprometedoras –

em especial, a corrosão de suas armaduras. Estruturas portuárias e industriais são exemplos de construções sujeitas a este tipo de degradação.

Ao longo dos anos, diversas ideias foram desenvolvidas a fim de melhorar o comportamento das armaduras à corrosão, tais como barras revestidas com resina epóxi, armaduras e cordoalhas galvanizadas para concreto protendido; armaduras revestidas com combinação de zinco e resina epóxi; armaduras com revestimento inoxidável e armaduras de aço inoxidável (Head *et al*, 2015)

Uma alternativa viável compreende a utilização dos polímeros reforçados por fibra, uma classe de compósitos em que à propriedade básica dos plásticos (baixo peso, moldabilidade, excelente resistência à corrosão, excelente isolamento térmico) são conferidas propriedades de resistência às solicitações mecânicas através da adição de fibras contínuas - como o vidro, aramida, carbono e basalto.

Comportamento mecânico

A principal característica das armaduras não metálicas e que as diferencia das armaduras de aço é o fato de que seu comportamento tensão *vs.* deformação é linear e elástico até a ruptura. Este fenômeno implica em uma série de consequências às estruturas de concreto armadas com FRP. Além disto, o módulo de elasticidade apresentado pelo material compósito é inferior, da ordem de 25%, daquele apresentado pela armadura de aço.

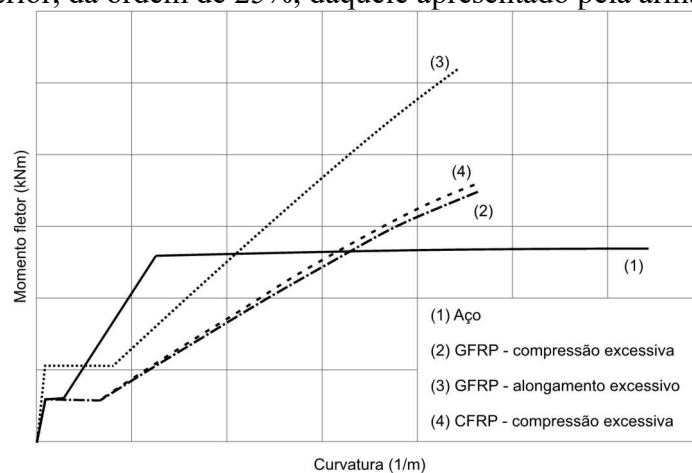


Figura 1 – Comportamento à flexão de uma mesma seção armada com diferentes tipos de armadura, adaptado do ACI 440.1R-15 (2015)

Em vigas de concreto com armadura tradicional tira-se proveito da propriedade de escoamento do aço, o que confere bom comportamento dúctil, capacidade de redistribuição de esforços e ruptura com aviso. O alto módulo de elasticidade das armaduras de aço e o seu bom desempenho quanto à aderência garantem relativamente pequena deformabilidade das estruturas e controle da abertura de fissuras. Normalmente, o estado limite último condiciona o dimensionamento.

Quando se utilizam armaduras não metálicas, estes fenômenos não acontecem. Pelo fato do módulo de elasticidade da armadura de FRP ser baixo, a rigidez da estrutura também se torna menor e assim esperam-se maiores deformações e grandes aberturas de fissuras, mesmo para as cargas de trabalho. Por isso, o comportamento em serviço pode condicionar o dimensionamento.

O comportamento linear e elástico da armadura até sua ruptura faz com que não exista comportamento dúctil. Nesse caso, quando ocorre ruptura na flexão por alongamento excessivo, ela se dá de maneira repentina e catastrófica (Nanni, 1993). Por isso, atualmente as regulamentações de projeto indicam coeficientes de ponderação conservativos para a armadura de FRP e sugerem que o dimensionamento seja controlado pela ruptura no concreto comprimido. Além disso, a falta da ductilidade acarreta em uma capacidade de redistribuição de momentos pequena (Tezuka *et al*, 1995), de forma que as regulamentações de projeto sugerem evitar o uso dessas armaduras quando este fenômeno é necessário.

Finalmente, a natureza da conformação superficial, a menor resistência a esforços transversos à barra e a diminuição da capacidade resistente fazem que o comportamento aos esforços cortantes também seja diferente do observado no concreto armado tradicional. Nesse aspecto, embora as normas de projeto existentes partam dos mesmos pressupostos (menor região comprimida, influência da taxa de armadura longitudinal e da resistência do concreto, influência das deformações nos estribos e diminuição da resistência devida à dobra), os resultados por elas apresentados são bastante discrepantes, como observado por Oller *et al* (2015), que comparou o resultado experimental de 112 vigas às previsões teóricas das normas, observando dispersos resultados, como observado na Figura 2. Nesta figura, à esquerda apresenta-se a comparação de resultados para a norma ACI-440 (2006) ao centro a comparação de resultados para a norma canadense CSA S806-12 (2012) e à direita a comparação com a norma italiana CNR-DT203 (2006).

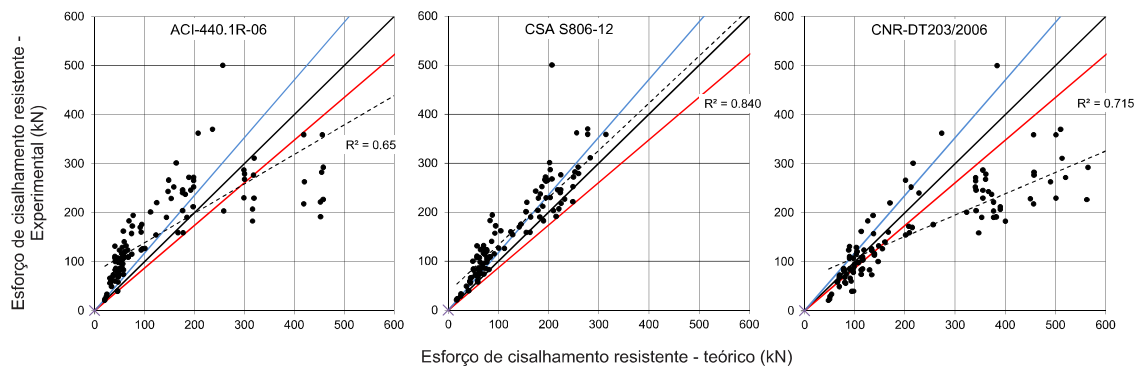


Figura 2 – Esforços de cisalhamento – teórico vs experimental de acordo com algumas recomendações de projeto, extraído de Oller *et al* (2015)

Trabalhos realizados no Brasil

Na literatura técnica, embora se encontrem muitos trabalhos internacionais a respeito deste tema, no Brasil ainda são poucos os trabalhos dedicados às armaduras não-metálicas. Tavares (2006) ensaiou seis vigas à flexão com dimensões de 15 cm x 30 cm x 305 cm, sendo uma armada longitudinalmente e transversalmente com aço e as demais armadas longitudinalmente com barras de GFRP e transversalmente com aço. O trabalho dessa autora teve caráter pioneiro, por ser o primeiro realizado no Brasil, embora ainda tenham sido utilizadas armaduras importadas, do tipo ASLAM 100, da marca americana Hughes Brothers. Esse trabalho estudou basicamente o comportamento dos modelos experimentais à flexão, tanto em serviço quanto em relação à capacidade última. A autora apontou as dificuldades na realização dos ensaios de caracterização e no processo de

armação das vigas, devido à sua flexibilidade. Em sua conclusão, apontou também que a limitação das deformações excessivas das vigas pode controlar o dimensionamento.

Couto (2007) analisou o comportamento quanto à aderência entre as barras de GFRP e o concreto, realizando ensaios do tipo arrancamento (“pull-out”) e posteriormente modelando este comportamento numericamente, através de um modelo de elementos finitos elaborado no software ANSYS. Novamente foram utilizadas barras de GFRP importadas, do tipo ASLAN 100. Foram consideradas barras com diâmetros de 9 e de 16 mm. Variou-se a resistência do concreto entre 30, 60 e 80 MPa e foram considerados cinco exemplares para cada corpo de prova. Essa autora também relatou dificuldade na realização dos ensaios de caracterização das barras, especialmente quanto à tração, pois ocorreu falha por cisalhamento das barras na região próxima às ancoragens.

Também, de acordo com o observado na literatura, Couto relatou a ocorrência de ruptura da superfície das barras durante o ensaio de arrancamento, dependendo da resistência do concreto empregada. Verificou também que a resistência da aderência entre as barras e o concreto é controlada principalmente pela parcela de atrito.

Finalmente, em relação à análise numérica desenvolvida, destacou que um modelo computacional linear não representou bem o comportamento observado experimentalmente e que apenas os modelos relativos à resistência do concreto de 30 MPa encontraram aproximação com os resultados reais.

Investigações na Uerj

Com base na literatura técnica internacional, nos trabalhos realizados no Brasil, e especialmente a fim de melhor compreender o funcionamento das estruturas armadas com barras de FRP, e ainda tendo por pano de fundo a questão da durabilidade, desde 2014 a Universidade do Estado do Rio de Janeiro vem empreendendo, sob a coordenação da Prof. Dra Regina H. F. Souza, uma extensa pesquisa neste campo, cujos principais objetivos são:

- ✓ Estudar o funcionamento à flexão e ao cisalhamento de elementos de concreto completamente armados com barras de FRP de fabricação nacional;
- ✓ Estudar os mecanismos de transferência de esforços (ancoragens e traspasse);
- ✓ Estudar o efeito da diminuição da resistência devida a dobras na armadura;
- ✓ Estudar novos tipos de barras não metálicas;
- ✓ Estudar soluções para grandes estruturas com a utilização de pré-moldados armados com FRP;

Atualmente este trabalho envolve uma tese de doutorado, duas dissertações de mestrado, além de três projetos de conclusão de curso e outros trabalhos menores.

Os primeiros resultados deste programa tratam do ensaio à flexão de quatro pontos de vigas de concreto armado isostáticas inteiramente armadas (flexão e cisalhamento) com barras de fibra de vidro, cujo objetivo principal foi o de avaliar o comportamento dessas peças para diferentes taxas de armadura longitudinal e transversal. Esta investigação experimental será descrita a seguir.

Descrição dos modelos experimentais

Com o intuito de realizar o experimento, foram realizados ensaios de flexão em quatro pontos no Laboratório de Engenharia Civil (Lec) da Uerj quatro vigas de concreto inteiramente armadas com barras de GFRP fornecidas pela empresa brasileira “Stratus”.

As vigas continham seção transversal de 20×35cm. Foi utilizado em sua confecção concreto com f_{cm} igual a 32,6 MPa.

As quatro vigas formaram dois grupos distintos. O primeiro, composto pela V1A e pela V1B contiveram armadura longitudinal de 3 ϕ 12,5mm e armadura transversal de ϕ 7,4mm c.10. O segundo grupo, composto pela V2A e V2B contiveram armadura longitudinal de 5 ϕ 12,5mm dispostas em duas camadas, sendo a inferior com 3 barras e armadura transversal de ϕ 7,4mm c.7,5.

Para os ensaios, os modelos experimentais foram dispostos na prensa hidráulica Losenhausen – LOS de 1000 kN, de forma a apresentar um vão livre de 2,00 m e distância entre carga e apoio de 0,85m, promovendo uma relação a/d médio de 2,66, conforme esquematizado na Figura 3.

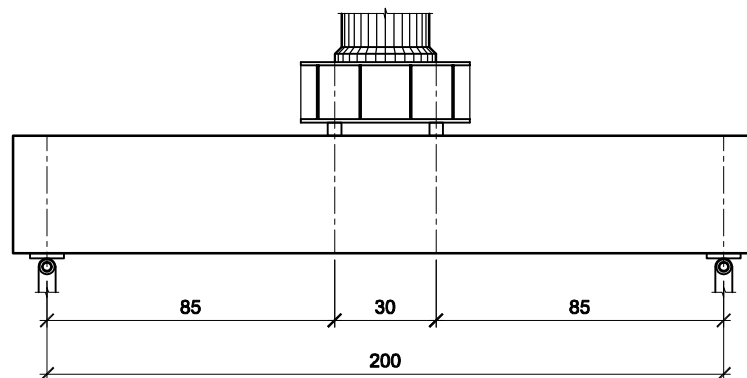


Figura 3 – Esquema dos ensaios (cotas em cm)

Na Tabela 1 estão descritas as armaduras e suas respectivas taxas geométricas para os quatro modelos experimentais analisados.

Tabela 1 – Modelos Experimentais

Modelo	A_f (cm ²)	A_{fw}/s (cm ² /m)	ρ_f	ρ_{fw}
V1A, V1B	3,68 (3 ϕ 12,5)	8,60 (ϕ 7,4 c.10)	0,00564	0,00430
V2A, V2B	6,14 (5 ϕ 12,5)	11,47 (ϕ 7,4 c.7,5)	0,00979	0,00573

Através da utilização de extensômetros nas armaduras e no concreto, e também de deflectômetros localizados na face inferior das vigas, foi possível obter as deformações no concreto comprimido e tracionado, as deformações nas armaduras longitudinais e transversais, bem como os deslocamentos no meio do vão.

Previsões teóricas

Para a obtenção das previsões teóricas, em relação ao comportamento à flexão, foi elaborado um algoritmo para determinação do diagrama momento curvatura, baseado nas hipóteses de cálculo para o concreto armado tradicional, que são válidas, segundo todas as regulamentações de projeto, para as armaduras de FRP, desde que sejam feitas as

considerações necessárias: comportamento linear e elástico até a ruptura e baixo módulo de elasticidade.

Para avaliação da capacidade resistente ao esforço cortante, foram considerados os preceitos do ACI 440.1R-15 (2015), da norma italiana CNR-DT-203 (2006) e da norma canadense CSA-806-12 (2012). Como se observa no gráfico apresentado na Figura 4, existe grande variação de resultados, decorrente da maneira como a deformação e consequente tensão nos estribos é tratada por cada norma. De maneira conservadora, adotou-se a previsão fornecida pelo ACI como parâmetro.

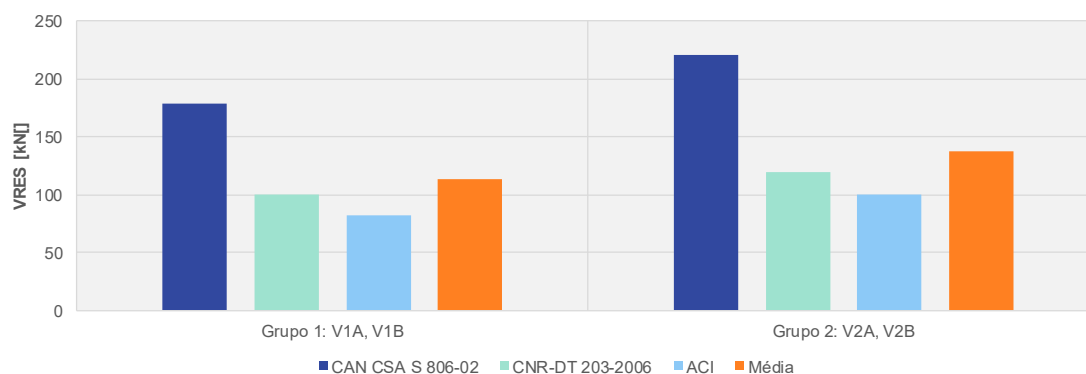


Figura 4 – Previsões teóricas de resistência ao cortante

A Tabela 2, a seguir, mostra as previsões teóricas encontradas para os modelos.

Tabela 2 – Previsões teóricas, de acordo com ACI 440.1R-15 (2015)

Propriedade	Grupo 1 V1A, V1B	Grupo 2 V2A, V2B
Curvatura relativa à fissuração (1/m)	$8,06 \times 10^{-4}$	$8,13 \times 10^{-4}$
Momento de fissuração (kNm)	13,32	13,59
Carga relativa ao momento de fissuração (kN)	15,67	15,99
Curvatura relativa ao momento último (1/m)	$5,94 \times 10^{-2}$	$2,46 \times 10^{-1}$
Momento último resistente (kNm)	79,25	97,44
Carga relativa ao momento último (kN)	93,24	114,63
Carga última resistente por cisalhamento (kN)	82,42	100,72
Carga última prevista (kN)	82,42	100,72

Observações dos ensaios e análise dos resultados

Através da utilização de extensômetros nas armaduras e no concreto, e também de deflectômetros localizados na face inferior das vigas, foi possível obter as deformações no concreto comprimido e tracionado; bem como as deformações nas armaduras longitudinais e transversais.

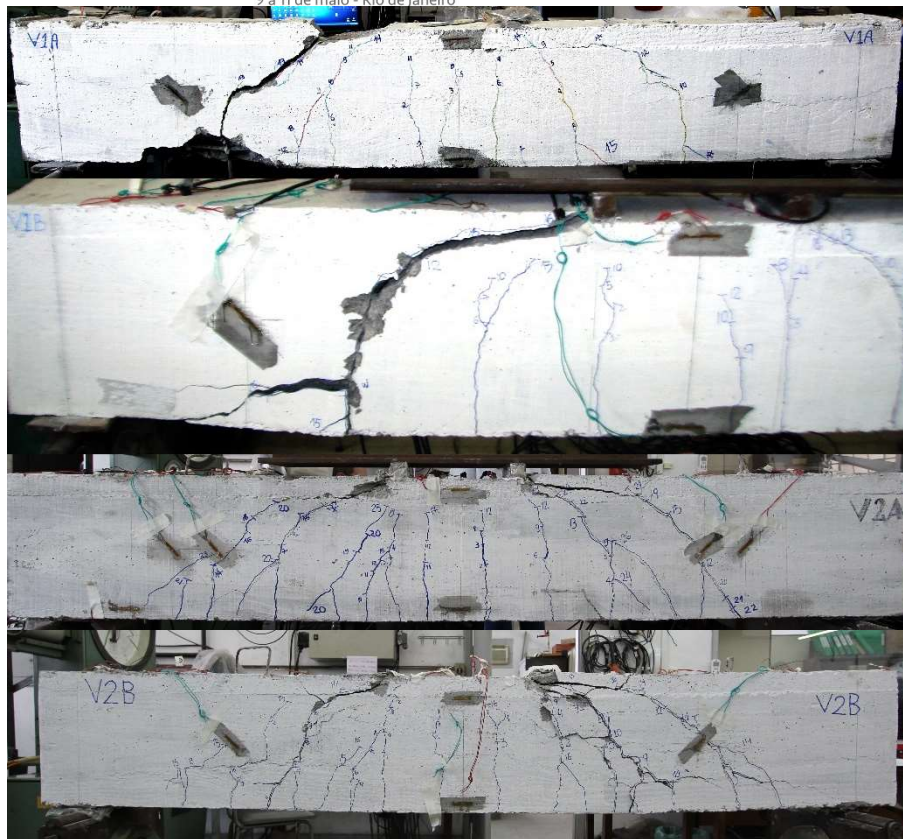


Figura 5 – de cima para baixo: Padrão de fissuração e ruptura dos modelos V1A, V1B, V2A e V2B

Como esperado, os modelos do grupo 1 (V1A e V1B) tiveram comportamento semelhante, assim como ocorreu entre os modelos do grupo 2 (V2A e V2B).

As vigas do grupo 1 possuíam estribos com maior espaçamento e menor quantidade de armadura longitudinal. Esta propriedade influenciou significativamente o comportamento. Observou-se o surgimento de poucas fissuras, inicialmente verticais que rapidamente atingiram a porção superior da viga – isto porque, dada a baixa rigidez da armadura, por equilíbrio de esforços, a linha neutra decresce rapidamente após a fissuração. Com a continuidade da abertura da fissura que se estendeu do ponto de aplicação da carga até o apoio, foram ouvidos diversos estalos, significando, como comprovou-se posteriormente com a “autópsia” dos espécimes, o escorregamento da armadura longitudinal inferior, seguindo pelo rompimento transversal das armaduras longitudinais superiores e por fim a ruptura dos estribos atravessados pela fissura, configurando a ruptura global das peças.



Figura 6 – À esquerda: rompimento dos estribos, e à direita: rompimento da armadura longitudinal superior, observados nas vigas do grupo 1

Já as vigas do grupo 2 possuíam maior quantidade de armadura, tanto longitudinal quanto transversal. O comportamento destes modelos durante o carregamento apresentou melhor aspecto de fissuração, com mais fissuras bem distribuídas. Igualmente a posição da linha neutra decresceu rapidamente após a fissuração, contudo, não se ouviram estalos nem se observou a ruptura de quaisquer barras. O modo de ruptura se deu por esmagamento do concreto na porção superior das vigas.

Tabela 3 – Cargas últimas observadas – experimentais vs. teóricas (kN)

Resultado	Grupo 1		Grupo 2	
	V1A	V1B	V2A	V2B
Experimental	65,84	73,53	124,15	111,77
Experimental (média)	69,69		117,96	
Teórico	82,42		100,72	
Relação Experimental/Teórico	0,80	0,89	1,23	1,11

Conclusões

Os experimentos realizados mostraram que a solução em armadura totalmente não metálica é válida e possível de ser utilizada na construção civil, desde que sejam observados cuidados adicionais compatíveis com as propriedades deste material.

Dentro do mesmo grupo, os ensaios revelaram que as vigas tiveram comportamento bem semelhante, o que é de grande importância para que este material possa ser utilizado com segurança.

As vigas do grupo 2 apresentaram excelente comportamento, de acordo com as previsões teóricas. Isto se explica porque a maior taxa de armadura longitudinal garantiu mais rigidez para os modelos ao passo que uma quantidade maior de estribos não só garantiu melhor comportamento ao cisalhamento como também promoveu confinamento do concreto, melhorando o desempenho global da peça.

As vigas do grupo 1 apresentaram ruptura precoce, se comparadas com as previsões teóricas. Isto se explica pela pouca rigidez dos modelos pela não existência de confinamento, o que levou a uma pior resposta quanto aos esforços transversais. Além disto, a armadura longitudinal superior foi fortemente solicitada e, como possui baixa resistência transversal, sucumbiu rapidamente.



Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à CAPES pelo apoio financeiro; aos engenheiros Marcos Lima da Stratus, José Abreu da Lafarge-Holcim e Alciro Flores da Tecnosil pela doação das barras de fibras de vidro, do cimento e do aditivo para concreto, sem o que esta pesquisa não se concretizaria.

Referências

- HEAD, M. *et al.* Stainless Steel Prestressing Strands and Bars for use in Prestressed Concrete Girders and Slabs. Maryland State Highway Administration / Morgan State University, Baltimore, p. 121. 2015.
- NANNI, A. Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, N.º 11, pp. 3344-3359, 1993.
- TEZUKA, M *et al.* Experimental study on moment redistribution of continuous beams reinforced or pretensioned with fiber reinforced plastic, in *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*. L. Taerwe (ed), E&FN Spon, London, UK, pp. 387-394, 1995.
- OLLER, E. *et al.* Shear design of reinforced concrete beams with FRP longitudinal and transverse reinforcement. *Composites Part B*, Vol 74, pp. 104-122, 2015
- TAVARES, D. Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP. Dissertação de mestrado da USP – São Carlos. 2006.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440.1R-15 – Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. 2015.
- STANDARDS COUNCIL OF CANADA. CAN/CSA-S806-12 – Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. 2012
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. CNR-DT 203/2006 – Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. 2006.
- COUTO, I. Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero. Dissertação de Mestrado da USP-São Carlos. 2007.