

APLICAÇÃO DE LAMINADO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO (PRFC) INSERIDO EM SUBSTRATO DE MICROCONCRETO COM FIBRAS DE AÇO PARA REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

Ana Paula Arquez¹ & João Bento de Hanai²

Resumo

A técnica estudada é conhecida como Near Surface Mounted (NSM), que consiste na inserção de laminados de polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) em entalhes realizados no concreto de cobertura de elementos de concreto armado. Considerando que a boa qualidade do concreto é imprescindível à eficiência do reforço, propõe-se uma inovação técnica pela reconstituição da face tracionada da viga com um compósito cimentício de alto desempenho, utilizando fibras e microfibras de aço, que sirva como substrato para aplicação do PRFC. Foram realizados ensaios de aderência para estudar o processo de transferência de tensões cisalhantes do laminado para o compósito na zona de ancoragem da viga. Uma vez conhecido o comportamento do sistema, foram ensaiadas vigas de concreto armado, em três diferentes versões de ancoragem do laminado. Comprovou-se a eficiência da inovação proposta, constatando-se o aumento da rigidez e da capacidade de carga da viga reforçada, com excelente aproveitamento do laminado.

Palavras-chave: Reabilitação – estruturas. Reforço de vigas. Fibras de carbono (PRFC). Concreto com fibras de aço. Aderência.

APPLICATION OF CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) STRIPS INSERTED IN A STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE LAYER (NSM – NEAR SURFACE MOUNTED) FOR FLEXURAL STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Abstract

The technique analyzed is known as Near Surface Mounted (NSM), which involves inserting CFRP strips into grooves made on the concrete cover of reinforced concrete elements. Whereas the good quality of this concrete is essential to strengthening efficiency, an innovative technique is proposed. A high-performance cementitious composite, with steel fibers and microfibers of steel, is used as a transition layer for insertion of CFRP strips. Bonding tests were performed to analyze the shear stress transferring from the CFRP laminate to the beam anchorage zone. Once known the system behavior, reinforced concrete beams were tested in three different versions of the anchorage condition. The efficiency of the proposed innovation was proved by confirming increased stiffness and load capacity of the strengthened beam.

Keywords: Sstructural rehabilitation. Strengthening RC beams. Carbon fibers (CFRP). Steel fiber reinforced concrete. Bond.

¹ Mestre em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, anaeng@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, jghanai@sc.usp.br

1 INTRODUÇÃO

A reabilitação de estruturas é praticamente tão antiga quanto às próprias estruturas de concreto armado. Erros de projeto e/ou execução, mudança na carga de utilização e sinistros, podem levar a uma releitura da capacidade de carga da estrutura. Vários são os métodos e materiais disponíveis no mercado que possibilitam essa reabilitação. Em substituição aos processos mais comuns e antigos, encontra-se o reforço de estruturas utilizando fibras sintéticas. Dentre elas, destaca-se o sistema polimérico estruturado com fibra de carbono. O material, conhecido no meio técnico pela sigla PRFC (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) é indicado para reforçar qualquer elemento estrutural onde é exigido pouco peso, elevada resistência à tração e corrosão, e necessidade de resistência à fadiga. Ele é fixado ao elemento estrutural utilizando um adesivo epóxi através da colagem externa ou por colagem interna.

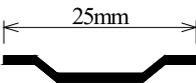
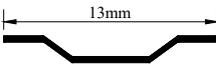
A presente pesquisa propõe o estudo do reforço à flexão de vigas de concreto armado através da técnica conhecida por Near Surface Mounted (NSM), onde o laminado de PRFC é inserido em um entalhe realizado no concreto de cobertura do elemento estrutural. Associado à técnica, estuda-se um processo de preparação do substrato que receberá o reforço, aplicando um compósito cimentício de alto desempenho confeccionado com fibras e microfibras de aço.

2 METODOLOGIA E ANÁLISE DE RESULTADOS

2.1 Mecânica do fraturamento

Muitas vezes, estruturas a serem reforçadas devem passar por um processo de reparo antes de receberem os materiais de reforço. Associado a esse fato tem-se a característica natural da baixa resistência à tração do concreto, mesmo que em boas condições. Admitindo que o laminado de PRFC é mais resistente à tração que o aço e deverá estar aderido ao concreto, fica evidente que existe uma incompatibilidade no sistema de reforço.

Tabela 1 – Característica das fibras de aço

Parâmetros	Fibra: Wirand® FS8	Microfibra
Formato Longitudinal		
Diâmetro nominal	0,75 mm	0,75 mm
Área da seção transversal	0,4418 mm ²	0,4418 mm ²
Fator de forma	33	17
Tensão máxima de tração	1100 MPa	1100 MPa
Peso Específico	7850 kg/m ³	7850 kg/m ³

Pensando nisso, foi proposta a substituição do concreto situado na parte tracionada da viga por um compósito que respondesse melhor à solicitação. Uma maneira de atender a essa exigência foi inserir fibras de aço no concreto, de modo a obter um material mais dúctil, com conseqüente controle da abertura das fissuras. Porém, as fibras de aço só apresentam resposta significativa na

fase pós-pico de carga, o que permite que microfissuras se formem na matriz cimentícia com cargas inferiores. Para esse fato, foi desenvolvida uma microfibras de aço, ainda não encontrada comercialmente, com o intuito de atenuar o processo de microfissuração e melhorar a transferência de tensões da matriz para as fibras na fase pré-pico de carga, através do aumento da aderência. As características das fibras de aço utilizadas podem ser vistas na Tabela 1.

Uma matriz cimentícia especialmente desenvolvida para incorporar fibras e microfibras de aço foi elaborada. A dosagem foi realizada seguindo os procedimentos propostos por Metha e Monteiro (1994) buscando uma resistência à compressão igual a 50 MPa. Porém ao inserir fibras e microfibras de aço no concreto, naturalmente há uma perda de trabalhabilidade o que pode ser corrigido através das propostas desenvolvidas por Oliveira, Ramos e Gomes (2005) e Figueiredo (2000), além do uso de superplastificante.

Para compor o traço do compósito, estimou-se inicialmente o consumo de 1% de fibra e 2% de microfibras, baseado nas taxas utilizadas por Ferrari (2007). O resultado final foi:

$$1 : 2,30 : 1,70 : 0,48$$

Depois de verificar experimentalmente a trabalhabilidade do compósito com essa taxa, novas taxas foram propostas, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Consumo de fibras para produção dos compósitos

Compósito	Taxa de fibra	Taxa de microfibras
CPM1A1C	1,0%	1,0%
CPM1A1,5C	1,0%	1,5%
CPM1A2C	1,0%	2,0%
CPM1,5A1C	1,5%	1,0%
CPM1,5A1,5C	1,5%	1,5%
CPM1,5A2C	1,5%	2,0%

Para avaliar as melhorias proporcionadas pela adição de fibras de aço ao concreto, foi realizado o ensaio proposto pela RILEM TC 162-TDF (2002). O método analisa o comportamento de um bloco de concreto não armado e entalhado no sentido transversal, ensaiado à flexão em três pontos. Com base nos gráficos *força x deslocamento vertical* ou *força x abertura da fissura* obtidos durante o ensaio, calculam-se parâmetros como resistências equivalentes e residuais em pontos específicos, que servem como objetos de análise da resistência ao fraturamento do material.

A Figura 1 apresenta a configuração do ensaio.

Foram confeccionados cinco corpos de prova prismáticos para cada compósito, além de seis corpos cilíndricos para realização de ensaios à tração e à compressão de acordo com as normas ABNT NBR 7222:1994 e ABNT NBR 5739:1994, respectivamente. Por questão de espaço, os parâmetros propostos pela RILEM TC 162-TDF (2002) foram calculados, mas não serão apresentados, podendo ser visualizados apenas os valores médios dos parâmetros na Tabela 3.

Fazendo-se uma comparação entre a força máxima resistida pelo concreto (F_M) e a força máxima atingida no intervalo de deslocamento entre 0 e 0,05 mm (F_L) (que corresponde ao limite de proporcionalidade), em todos os casos, a F_M foi superior à F_L . Isso significa que para atingir a carga máxima houve uma deformação maior do corpo de prova, adentrando ao intervalo correspondente à parcela de contribuição das fibras. Observa-se que a força F_L , que delimita a contribuição da matriz,

apresenta pequena variação entre os compósitos. O comportamento é o esperado já que todos os compósitos apresentam a mesma matriz. A diferença perdura na taxa de microfibras. Com exceção do compósito CPM1,5A2C, o aumento da taxa de microfibras, aumenta a força F_L . Em contrapartida, a força F_M , que já faz parte da contribuição das fibras, apresenta variação de até 38%. O aumento da F_M em relação à F_L foi maior para o compósito CPM1,5A1C, que obteve 44% de melhoria, mas a melhor resposta foi do CPM1,5A1,5C.

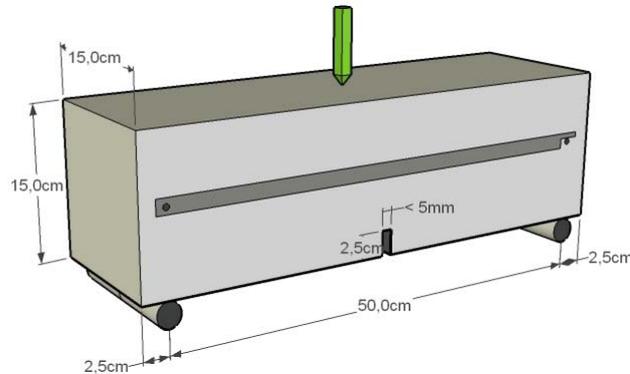


Figura 1 – Configuração do ensaio de mecânica de fraturamento.

Tabela 3 – Resultados médios obtidos

Compósito	f_c (MPa)	f_t (MPa)	Forças (kN)				Resistências (MPa)				
			F_L	F_M	$F_{R,1}$	$F_{R,4}$	$f_{fct,L}$	$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$	$f_{R,1}$	$f_{R,4}$
CPM1A1C	33,2	2,5	12,2	14,3	11,4	0,9	3,6	3,5	2,4	3,4	0,3
CPM1A1,5C	30,6	2,2	12,0	15,2	12,1	2,7	3,5	3,8	2,5	3,6	0,8
CPM1A2C	33,4	3,2	14,4	18,9	15,9	1,8	4,1	4,9	3,0	4,5	0,5
CPM1,5A1C	28,3	2,6	12,8	18,5	16,0	2,4	3,7	4,9	2,4	4,6	0,7
CPM1,5A1,5C	30,5	2,9	15,2	19,8	17,5	1,3	4,3	5,3	3,6	4,9	0,4
CPM1,5A2C	29,2	2,4	10,9	15,6	13,7	3,2	3,2	4,4	2,9	4,0	0,9

Também são comparadas as resistências dos compósitos antes e após o limite de proporcionalidade até o ponto pré-determinado δ_2 . Assim como ocorreu com as forças, as tensões de flexão equivalente ($f_{eq,2}$) tiveram considerável aumento em relação às resistências da matriz cimentícia ($f_{fct,L}$), com exceção do compósito CPM1A1C. Em geral, as resistências da matriz também obtiveram pouca variação, com seu aumento atrelado ao aumento da taxa de microfibras, com exceção do compósito CPM1,5A2C. O aumento da $f_{eq,2}$ em relação à $f_{fct,L}$ chegou a 36% no compósito CPM1,5A1C, mas a tensão equivalente máxima foi obtida pelo compósito CPM1,5A1,5C.

Utilizando o valor de tensão de flexão equivalente $f_{eq,3}$ para analisar o deslocamento mais avançado (δ_3), observa-se que o compósito de maior tenacidade, ou com maior energia absorvida até ponto δ_3 , foi o CPM1,5A1,5C, seguido do CPM1A2C. Isso demonstra que, para uma maior deformação, ele é o compósito mais resistente. O fato torna-se interessante quando o objetivo é produzir uma viga reforçada com característica mais dúctil, capaz de se deformar sem desprender o laminado através da formação de fissuras. Em média, os compósitos com maior taxa de fibra apresentaram os maiores valores de $f_{eq,3}$, indicando que as fibras corresponderam às expectativas.

Diante dos resultados, foi perceptível que o concreto com as melhores respostas ao objetivo proposto foi o compósito CPM1,5A1,5C. O problema é que, além de apresentar menor trabalhabilidade, o compósito possui uma taxa de microfibras igual a 1,5%, porém o consumo desse material é um fator limitador da pesquisa dado a dificuldade de fornecimento. A questão da trabalhabilidade do CPM1,5A1,5C poderia ser facilmente resolvida com o aumento da adição de superplastificante. Mas na tentativa de prevenir o problema da falta de microfibras para o ensaio final, optou-se em adotar o compósito CPM1,5A1C, também com resultados satisfatórios, porém com menor consumo de microfibras e melhor trabalhabilidade.

2.2 Aderência

Escolhido o compósito cimentício que irá substituir parte da face tracionada da viga, estuda-se o conjunto concreto-resina-laminado, considerando que o bom desempenho da técnica proposta depende da garantia desse trabalho conjunto. Além disso, é necessário caracterizar e quantificar a mobilização de esforços no laminado.

Com esse objetivo, buscou-se um ensaio que permitisse a análise das interfaces dos materiais, gerando resultados em termos de tensão no laminado x deslizamento. Por isso, optou-se por realizar o ensaio de aderência proposto por Cruz e Barros (2003).

A Figura 2 apresenta a configuração do ensaio, que consiste em dois blocos de concreto confeccionados com o compósito desenvolvido anteriormente e não armados, unidos na parte superior por uma rótula metálica e na parte inferior pelo laminado.

O ensaio restringiu-se ao bloco A, onde variou o comprimento de ancoragem do laminado (L_a), enquanto que no bloco B, o laminado teve comprimento de ancoragem constante (325 mm), suficiente para que não houvesse deslizamento.

Foram testados três comprimentos de ancoragem: 70, 140 e 210 mm, sendo confeccionados dois modelos para cada comprimento. Suas nomenclaturas ficam assim designadas: M_xL_y onde x é o número do modelo (1 ou 2) e y o comprimento de ancoragem.

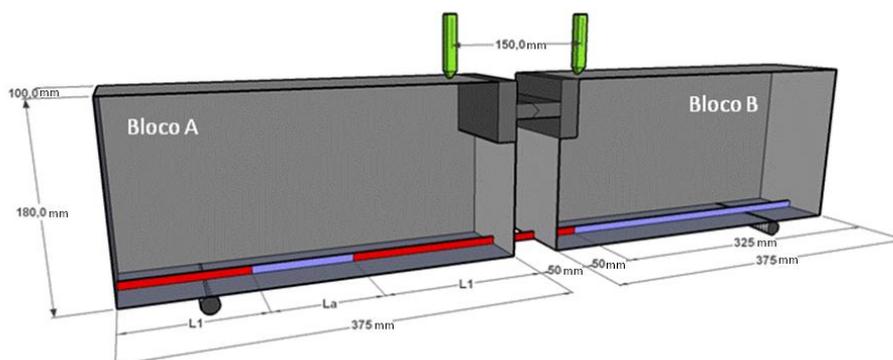


Figura 2 – Esquema do ensaio de aderência proposto por Cruz e Barros (2003).

Além dos doze blocos de concreto, foram confeccionados seis corpos de prova cilíndricos para realização de ensaios à tração e à compressão, de acordo com as normas específicas. Os resultados encontrados foram 3,36 MPa e 31,98 MPa, respectivamente.

Três amostras de laminado, com um metro de comprimento cada, foram ensaiadas segundo a ASTM D3039/D 3039M (2008) e os resultados médios estão apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 – Propriedades físicas do laminado obtidas em ensaios de caracterização

Força Máxima (kN)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Última (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
52,67	1562	1,25	116

A resina utilizada para fixação do laminado no concreto foi a Sikadur® 330, mas por questões de cronograma nenhum ensaio foi realizado para confirmar os dados fornecidos pelo fabricante. Nesse caso, os dados disponíveis estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades da resina Sikadur® 330 fornecidas pelo fabricante

Resistência à Tração	Resistência à Aderência (MPa)	Módulo de Elasticidade		Alongamento na Ruptura (%)
		na Flexão (MPa)	na Tração (MPa)	
30	> 4	3800	4500	0,9

Passados doze dias da concretagem, os blocos de concreto foram retirados da câmara úmida e procedeu-se a execução dos entalhes. Utilizando dois discos de corte por meio de via úmida, as aberturas ficaram com aproximadamente 5 mm de espessura e 18 mm de profundidade. Ao término, os modelos foram lavados e depois de secos, procedeu-se a limpeza.

Os laminados foram cortados com comprimento pouco maior que 80 cm para fixação de dispositivo que auxiliaria na medição do deslocamento horizontal do laminado.

Tanto no laminado como nos blocos de concreto foram demarcados os comprimentos de ancoragem antes de receberem a resina epóxi. Esta, por sua vez, foi misturada nas condições e proporções indicadas pelo fabricante e aplicadas com auxílio de espátula tanto no laminado quanto no entalhe. Após a colocação do laminado no entalhe, o excesso de resina foi retirado e os modelos permaneceram intactos até a realização dos ensaios, que ocorreram vinte dias depois.

No ensaio foi utilizada a máquina servo-hidráulica da marca Instron, sob controle de deslocamento do pistão a uma taxa de 0,005 mm/s. O sistema de aquisição de dados foi o System 5000 da marca Vishay. Os demais itens podem ser observados na Figura 3.

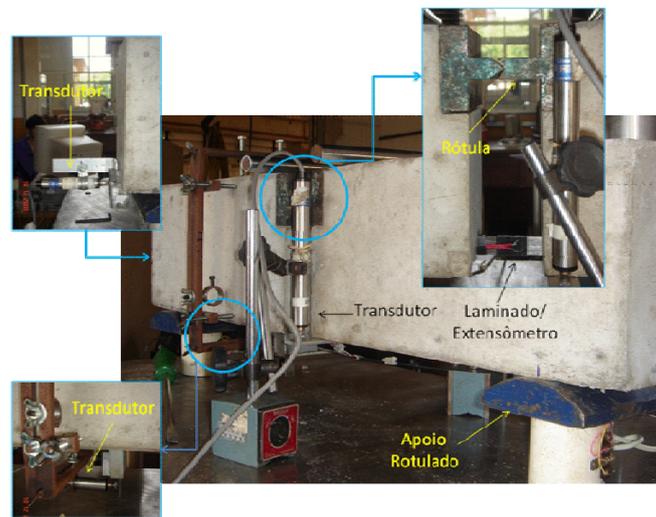


Figura 3 – Esquema de montagem do ensaio de aderência.

Após concluir os ensaios, a primeira análise realizada foi em relação à forma de ruptura da ligação. Para isso, uma cuidadosa inspeção visual nos modelos foi necessária e verificou-se que, com exceção de um deles, todas as falhas ocorreram entre o laminado e a resina, sem qualquer sinal de fissuração no concreto. O modelo acima citado apresentou profundidade do entalhe inferior à largura do laminado, permitindo que parte desse ficasse exposto. O modelo corresponde ao M1LA 210 e devido à redução na área de aderência, houve o deslizamento do laminado. Dessa maneira, seus resultados foram desprezados.

Foram estudadas a força no laminado e a tensão de aderência entre os materiais. A força no laminado foi obtida por duas maneiras: através da equação de equilíbrio das forças internas e através da deformação obtida através do extensômetro, sendo o segundo método o mais preciso.

A Figura 4 apresenta a força máxima imposta ao laminado para cada comprimento de ancoragem. Nota-se que quanto maior esse comprimento, maior a força imposta.

A tensão de aderência, talvez seja a característica mais importante do estudo em questão, já que é ela que torna possível a ação conjunta dos materiais.

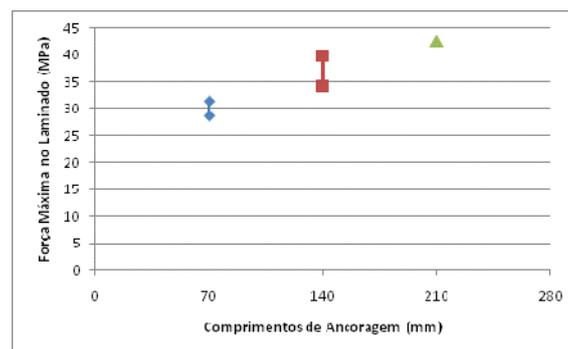


Figura 4 – Gráfico força máxima no laminado x comprimento de ancoragem dos modelos.

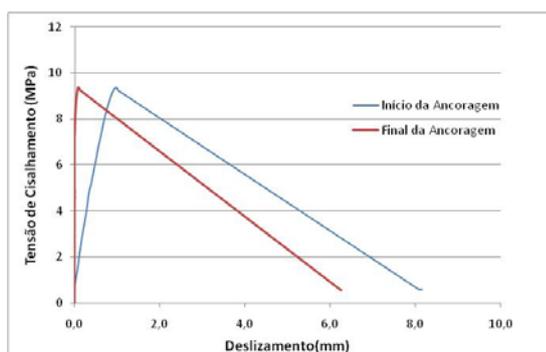
Analogamente ao estudo de ancoragem com barras de aço tem-se:

$$\tau_l = \frac{F_l}{2.(e+l).LA} \quad (1)$$

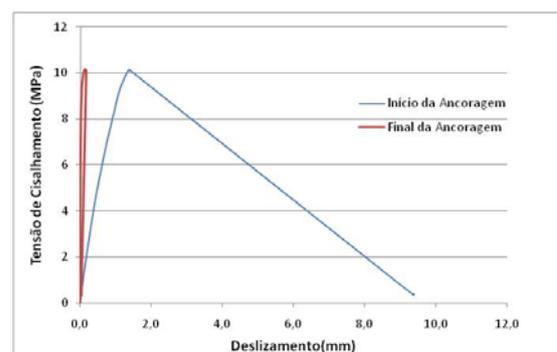
onde: F_l é a força de tração no laminado; l é a largura do laminado; e é a espessura do laminado e LA é o comprimento de ancoragem.

A Figura 5 mostra os gráficos com os valores da tensão de cisalhamento no início e no final da zona de ancoragem ao longo da aplicação de carga.

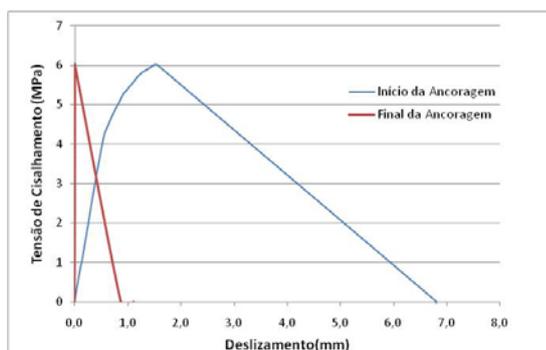
De forma geral, o início da zona de ancoragem tem seu início linear e em seguida passa para um regime não-linear, ditado pelo comportamento do adesivo até a força máxima. Por fim, com a deformação do adesivo e o possível rompimento de aderência entre laminado e resina, há a perda de carga e o deslizamento torna-se mais intenso. Já no final da zona de ancoragem, corresponde àquele esperado para um ensaio de arrancamento clássico: no início o deslizamento é nulo e em seguida aparece uma zona quase linear até atingir a força máxima. Após o pico de força, as variações do deslizamento apresentam um ramo descendente cuja inclinação exprime a fragilidade do comportamento da ruptura da ligação de aderência.



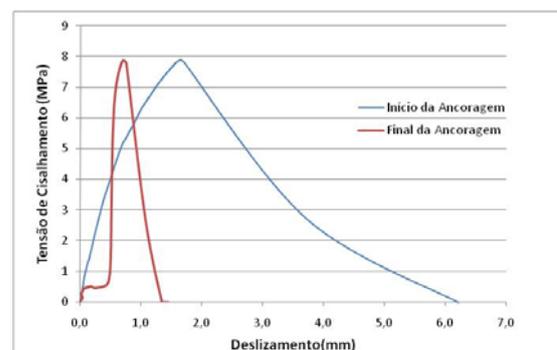
(a) M1LA70



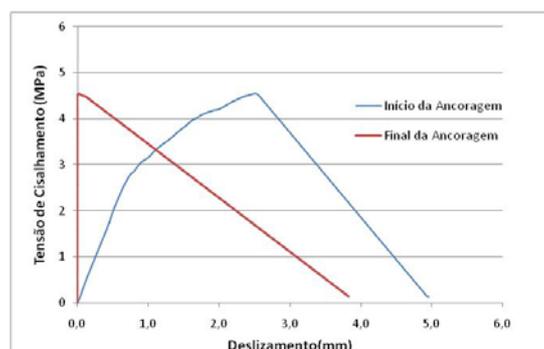
(b) M2LA70



(c) M1LA140



(d) M2LA140



(e) M2LA210

Figura 5 – Gráfico tensão de cisalhamento x deslizamento.

Apenas no M2LA70 houve desprendimento do dispositivo de referência colado ao laminado no final da zona de ancoragem. Todavia, pelo M1LA70, pode-se concluir que a ruptura se deu de maneira mais dúctil, se comparada a dos demais modelos. Surpreendentemente, o comprimento de 140 cm de ancoragem foi o que apresentou o comportamento mais frágil dos três comprimentos estudados, se se analisar o final do comprimento de ancoragem. Mas ao analisar o início, nota-se que quanto maior o comprimento de ancoragem, maior o deslizamento do conjunto resina-laminado para uma mesma tensão de cisalhamento. Isto remete à conclusão de que quanto maior esse deslizamento, maior o aproveitamento do laminado.

Realizadas as devidas análises, pode-se concluir que com o uso do compósito cimentício não houve fissuração do concreto adjacente à região de ancoragem do laminado, sendo que todas as rupturas ocorreram entre o laminado e a resina. Além disso, a força imposta ao laminado é diretamente proporcional ao comprimento de ancoragem. Quanto maior o comprimento de ancoragem, menor a tensão de cisalhamento e menor o deslocamento vertical para uma mesma tensão instalada no laminado.

2.3 Ensaio final

Para realização do ensaio final, foram moldadas oito vigas idênticas com seção transversal 17 x 35 cm e comprimento de 360 cm. O concreto foi adquirido de uma usina, sob especificação de resistência à compressão de 30 MPa. A Figura 6 apresenta as dimensões das vigas e o detalhamento das armaduras.

As oito vigas foram separadas em quatro grupos com o objetivo de analisar o comportamento do reforço segundo a técnica NSM, sob três maneiras distintas de ancoragem do laminado, utilizando a reconstituição da face tracionada com o compósito reforçado com fibras e microfibras de aço.

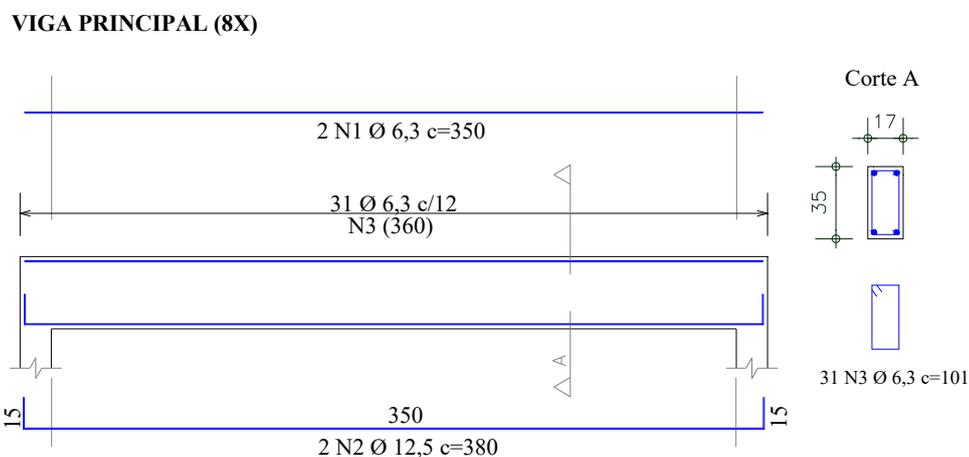


Figura 6 – Detalhamento das armaduras das vigas.

Tabela 6 – Características das vigas principais

Grupo	Viga	Característica
A	VA1/VA2	Vigas de referência (sem reforço).
B	VB1/VB2	Vigas reforçadas com dois laminados de PRFC.
C	VC1/VC2	Vigas cuja parte (8 cm) da região tracionada do concreto foi removida de

		apoio à apoio, reconstituída com o compósito CPM1,5A1C e reforçada com dois laminados de PRFC.
D	VD1/VD2	Vigas cuja parte (8 cm) da região tracionada do concreto foi removida apenas nos vãos de cisalhamento, reconstituída com o compósito CPM1,5A1C e reforçada com dois laminados de PRFC.

Os detalhes desses grupos podem ser vistos na Figura 7.

Após 14 dias da concretagem, as vigas dos grupos C e D foram demarcadas e apicoadas com britadeira manual. Em seguida receberam formas laterais e passaram por um processo de limpeza que incluiu jato de ar e lavagem para eliminação do pó remanescente. Tanto as formas quanto a superfície exposta do concreto foram molhadas antes de receber o compósito cimentício, evitando a absorção da água de hidratação. Após a viga apresentar superfície seca, o compósito foi adicionado, passando por uma breve vibração, apenas para expulsar o ar aprisionado. Para analisar o compósito seis corpos de prova cilíndricos foram moldados para serem analisados à tração e à compressão. O ensaio de caracterização apontou os valores de 4,61 MPa e 47,95 MPa respectivamente.

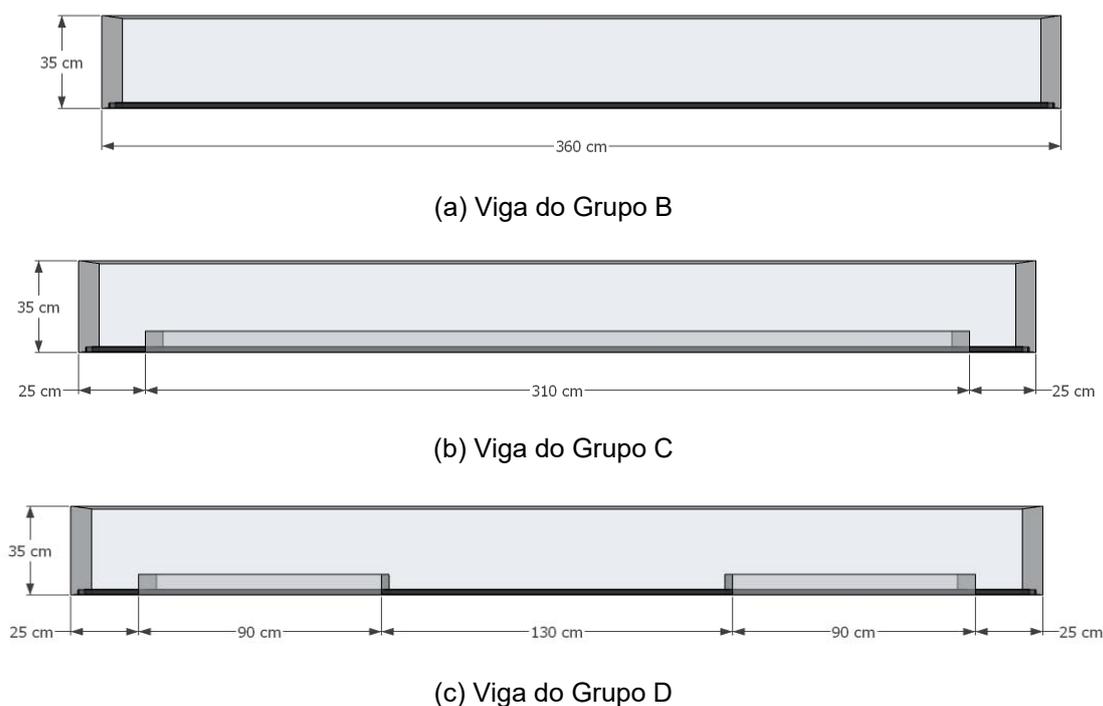


Figura 7 – Detalhes dos grupos das vigas.

Não houve utilização de qualquer tipo de resina para unir o compósito ao concreto da viga, acreditando que os estribos, associados à grande rugosidade proporcionada pelo apicoamento, fossem suficientes para impedir o deslocamento da junção.

Assim como no ensaio de aderência, o entalhe foi demarcado na viga e executado com auxílio de dois discos de corte por meio de via úmida sete dias após a concretagem, ficando as aberturas com aproximadamente 5 mm de largura e 18 mm de profundidade, distantes entre si 4 cm.

Os laminados foram cortados e limpos com álcool. O comprimento foi 2 cm maior que o comprimento das vigas, para fixação de aparato com o objetivo de medir o deslocamento horizontal do laminado.

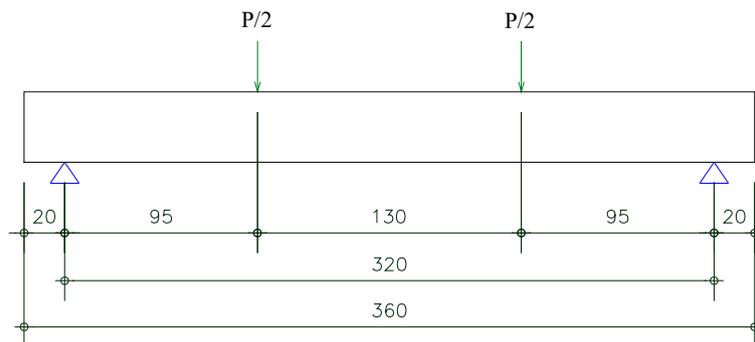


Figura 8 – Esquema estático das vigas principais.

Nessa fase, a fixação do laminado no entalhe, foi realizada com a resina epóxi bi-componente Sikadur[®] 30 nas proporções indicadas pelo fabricante (Parte A (3):Parte B (1) em peso ou volume). Suas propriedades podem ser vistas na Tabela 7, enquanto o esquema estático do ensaio à flexão em quatro pontos pode ser observado na Figura 8.

Para aplicação da carga foi utilizado um atuador servo-hidráulico da marca Instron com capacidade para 500 kN e curso de 150 mm, a uma velocidade de 0,005 mm/s de deslocamento do pistão. O sistema de aquisição de dados foi o System 5000 da marca Vishay. Ambos os apoios foram rotulados, permitindo o deslocamento horizontal da viga. Os demais equipamentos podem ser vistos na Figura 9.

Tabela 7 – Propriedades da resina Sikadur[®] 330 fornecidas pelo fabricante

Resistência à Flexotração (MPa)	Resistência à Aderência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Cisalhamento (MPa)
30	4*	12.800	0,9

* falha no concreto

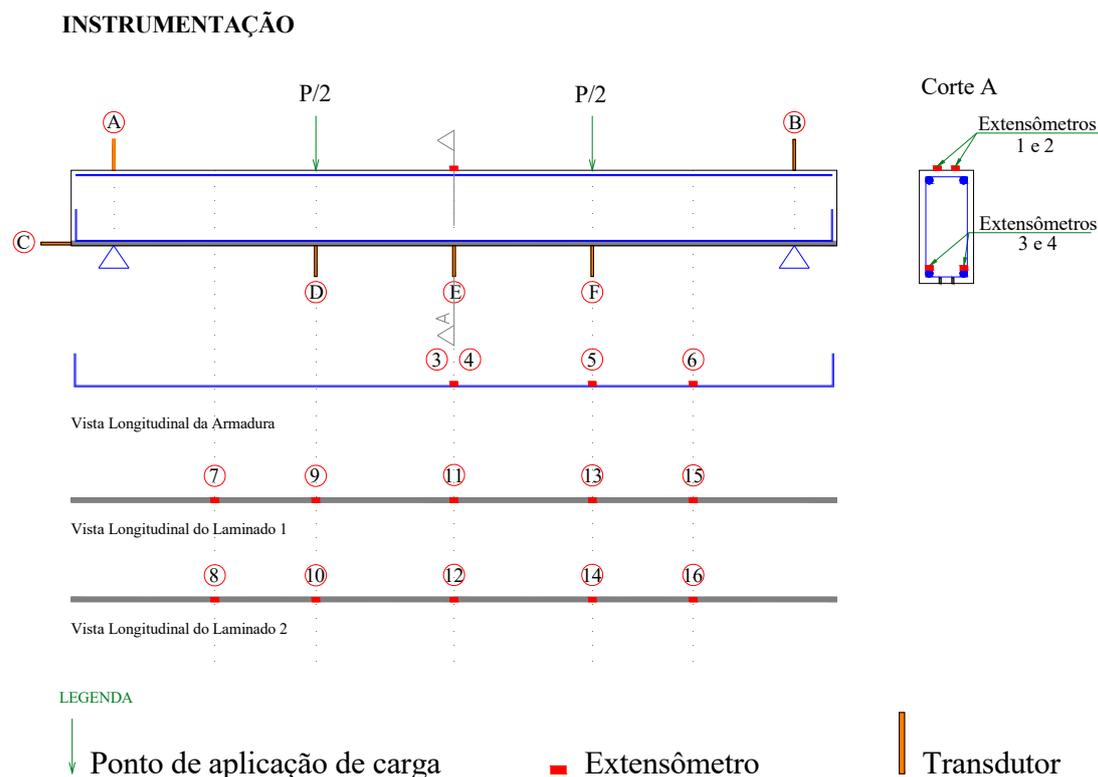


Figura 9 – Posicionamento da instrumentação nas vigas.

A média dos resultados dos ensaios de caracterização do laminado de PRFC pode ser vista na Tabela 8.

Tabela 8 – Propriedades físicas do laminado obtidas em ensaios de caracterização

Força Máxima (kN)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Última (%)	Módulo de Elasticidade (GPa)
45,70	1363	1,09	118

Pensando na segurança dos equipamentos e das pessoas envolvidas na realização dos ensaios, nenhuma viga atingiu a ruptura. Ao verificar que a deformação do aço, assim como do laminado aproximavam-se de seus limites, os ensaios eram paralisados. Nesse período não houve, em qualquer viga, sinal de destacamento do laminado ou separação entre o concreto da viga e o compósito cimentício da região reconstituída. Isso indica que a rugosidade proporcionada pelo apicoamento, somada aos estribos existentes na viga, é suficiente para integrar as duas fases de concreto sem a necessidade de produtos específicos para aderência.

Sem qualquer tipo de reforço, as vigas de referência tiveram formação de muitas fissuras, que rapidamente se propagaram. As vigas dos grupos B e D apresentaram grande quantidade de fissuras, porém com menores aberturas em comparação com as das vigas de referência. Fissuras de menores intensidades foram observadas nas vigas do grupo C. Isso permite concluir que o compósito cimentício, na região de maior propagação de fissuras (meio do vão) auxilia no controle de sua formação propagação.

Como não houve ruptura das vigas, seria imprudente comparar os resultados sem um parâmetro fixo comum a todas as vigas. Portanto, propôs-se utilizar o limite de deformação limite do aço no estado limite último (10‰), para servir como referência e possibilitar a análise dos resultados obtidos através das diferentes formas de ancoragem do laminado. Esse valor foi estabelecido porque, além dele, os elementos estruturais submetidos à ação de momento fletor podem apresentar fissuras com grandes aberturas, o que estruturalmente não é interessante. Dessa maneira, as forças máximas atingidas foram as seguintes (Tabela 9):

Tabela 9 – Forças resistidas pelas vigas até a deformação limite do aço

Grupo	Viga	Força máxima (kN)	Incremento (%)	Deformação no laminado (‰)
A	VA1	88,94	-	-
	VA2	79,49	-	-
	Média	84,23	-	-
B	VB1*	99,15	17,7	5,36
	VB2	126,50	50,2	9,38
C	VC1	140,33	66,6	9,46
	VC2	136,94	62,6	9,58
D	VD1	123,00	46,1	8,33
	VD2	117,15	39,5	8,02

* Viga com problema durante o reforço e descartada

A Tabela 9 apresenta também as deformações máximas apresentadas nos laminados. É notável que a utilização do compósito cimentício em toda a extensão da viga (grupo C) favoreceu o aproveitamento quase que total do laminado. Por outro lado, seu uso apenas nos vãos de cisalhamento (grupo D) piorou o rendimento, inclusive comparado à viga sem inserção do compósito (grupo B). Ou seja, o compósito em si, não é o responsável pelo aumento da eficiência do laminado, mas os benefícios proporcionados por ele permitem o melhor aproveitamento do reforço, sobretudo em carregamentos mais avançados.

Em todos os casos de ancoragem, a deformação do concreto foi inferior à máxima admitida para os domínios 3 e 4, que é igual a 3,5‰, conforme a ABNT NBR 6118 (2003). Em nenhuma viga foi observada fissuração na região comprimida.

A Figura 10 apresenta as deformações nas barras de aço obtidas pelos extensômetros distribuídos em seus comprimentos. Os valores dos extensômetros 3 e 4 correspondem aos valores médios das duas barras.

Com exceção das vigas de referência (grupo A), todas as outras apresentaram melhor distribuição dos esforços, com maior aproveitamento do aço, inclusive a VB1 que teve problema na execução do reforço.

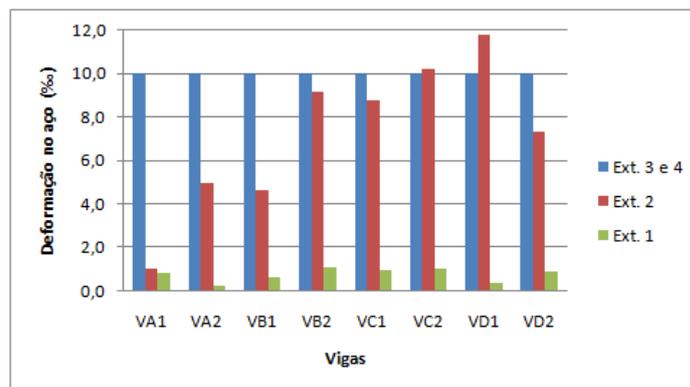


Figura 10 – Deformação no aço.

Para analisar o que ocorre simultaneamente com o concreto, o aço e o laminado, foi elaborada a Figura 11.

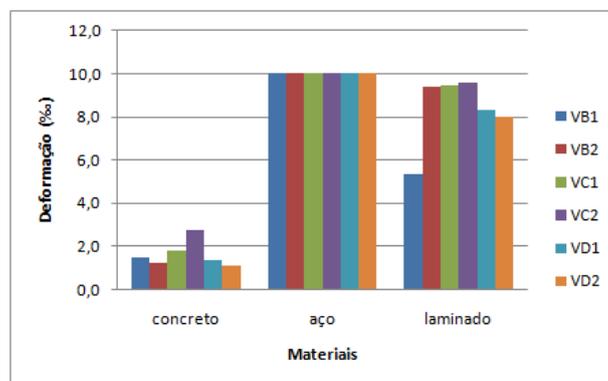


Figura 11 – Compatibilização entre as deformações.

Excluindo a VB1 da análise, devido aos seus baixos resultados, observa-se que sua similar, a VB2, apresentou resultado muito próximo ao maior valor obtido para deformação no laminado, atingido pela VC2. Por outro lado, a deformação no concreto foi uma das mais baixas, possibilitando incrementar mais o reforço, sem dano ao concreto comprimido.

Com valor de deformação no concreto similar ao da VB2, aparecem as vigas do grupo D. Porém, o aproveitamento do laminado é o menor comparado aos outros grupos, gerando uma solução anti-econômica. Por fim, existe o grupo C, que apresenta o melhor desempenho do laminado, mas também a maior deformação no concreto. Como explicado anteriormente, esse fato é justificado pela maior carga atuante na viga. O curioso é que mesmo com a deformação do aço atingindo 10%, ou seja, em seu patamar de escoamento, a deformação do laminado possui valor inferior. Este comportamento não respeita a hipótese de distribuição uniforme das deformações ao longo da seção transversal da viga. Por outro lado, proporciona o aumento de rigidez das vigas reforçadas.

Para entender melhor o que ocorre com a ductilidade das vigas, a Figura 12 apresenta os deslocamentos verticais ocorridos para dois valores fixos de carga, além dos deslocamentos máximos registrados. A primeira carga corresponde à média das forças máximas atingidas pelas vigas de referência, e igual a 84 kN. A segunda corresponde à carga máxima atingida pela VD2 que foi 117 kN.

Para a carga de 84 kN, enquanto as vigas de referência atingiam 29,54 mm na VA1 e 20,02 mm na VA2, as vigas reforçadas atingiram o valor máximo de 14,95 mm na VB2 e mínimo de 11,68 mm na VC1. A redução do deslocamento variou de 34% a 153%. Ou seja, independente da forma de ancoragem dos laminados, as vigas reforçadas são mais rígidas que as vigas sem reforço.

Aumentando a carga para 117 kN, portanto excluindo as vigas de referência e realizando a análise entre as vigas reforçadas, nota-se pouca diferença entre a VB2 (30,81 mm), a VD1 (28,66 mm) e a VD2 (29,56mm). Isso demonstra como comentado anteriormente, que o uso do compósito cimentício apenas nos vãos de cisalhamento não altera a rigidez das vigas. Por outro lado, seu uso em toda a extensão da viga, diminui o deslocamento para o valor máximo de 25,29 mm registrado na viga VC2, aumentando a rigidez em pelo menos 22%.

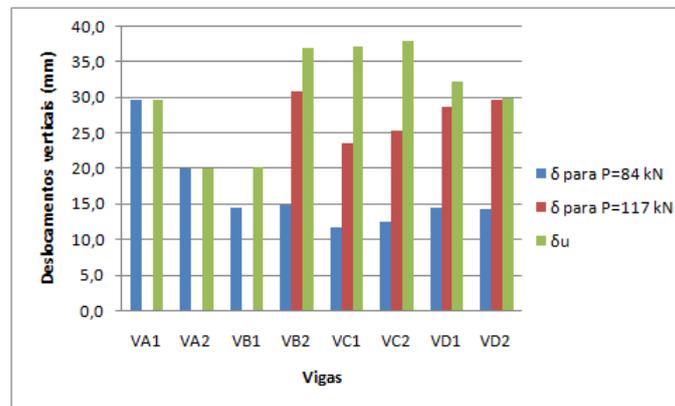


Figura 12 – Deslocamento das vigas para cargas pré-determinadas.

O deslizamento do laminado provocado pela deformação da viga foi praticamente imperceptível e uniforme entre os três diferentes tipos de ancoragem. Em todos os casos, mesmo para os carregamentos mais avançados, os deslizamentos alcançaram no máximo 0,13 mm.

3 CONCLUSÃO

Observando os resultados das três diferentes propostas de ancoragem do laminado, percebe-se uma significativa melhora nas vigas que tiveram toda a face tracionada reconstituída com o compósito cimentício (grupo C). O início de fissuração foi retardado, houve aumento na capacidade de carga, na rigidez e no aproveitamento dos laminados. Analisando as forças aplicadas nas vigas, observou-se acréscimo de carga variando entre 39,5% a 66,6% em relação às vigas de referência. Os maiores valores foram registrados nas vigas do grupo C, seguidos pelos grupos B e D. A deformação no laminado seguiu o mesmo comportamento, com deformação atingindo entre 73% (VD2) e 87% (VC2) do valor máximo. Isso se refletiu na rigidez das vigas e na diminuição da fissuração. Para os mesmos valores de carga, o deslocamento vertical das vigas do grupo C foi sempre inferior aos demais. Entretanto, o uso do compósito apenas nos vãos de cisalhamento não trouxe a resposta esperada, com o desempenho das vigas do grupo D mostrando-se equivalente ao das vigas do grupo B. Logo, pode-se dizer que o compósito cimentício em si, não é o responsável pelo aumento do aproveitamento do reforço. Porém, ele dá subsídios à viga para que haja melhora em seu comportamento perante a solicitação de momentos fletores.

4 AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela oportunidade de realizar o mestrado. Ao professor João Bento de Hanai, pela atenção e compreensão. À CAPES, pela bolsa concedida. À FAPESP pelo custeio dos ensaios. Às empresas Maccaferri e Sika pela doação dos materiais.

5 REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3039/D 3039M**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, PA, 2008.
- ARQUEZ, A. P. **Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 1994.
- CRUZ, J. S.; BARROS, J. A. O. Modelação da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento. In: CONGRESSO DE MECÂNICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 7., Évora, 2003. **Anais...** Évora: University of Évora, 2003. p. 587-596.
- FERRARI, V. J. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho**. 2007. 328p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. 2000. ISSN 0103-9830. BT/PCC/260.
- OLIVEIRA, L. A. P.; RAMOS, M.; GOMES, J. P. C. Dosagem de concreto auto adensável reforçado com fibras de aço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47. São Paulo, 2005. **Anais...** São Paulo, SP: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. p. 568-581.
- RILEM TC 162-TDF: **Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced concrete using the σ -w method: principles and applications**. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, v.35, p. 262-278, jun., 2002.