

Avaliação experimental de sistemas de ancoragem para CFRP

Experimental evaluation of CFRP anchorage systems

Natasha Cristina da Silva Costa

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará
Rua Augusto Corrêa, 1
Belém, PA, Brasil, 66075-970
nat.csc@gmail.com

Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

Professor Doutor, Universidade Federal do Pará
Rua Augusto Corrêa, 1
Belém, PA, Brasil, 66075-970
denio@ufpa.br

Resumo

Este trabalho objetiva avaliar o desempenho experimental de sistemas de ancoragem para reforço estrutural com fibra de carbono. Foram ensaiados 13 corpos-de-prova prismáticos de concreto com diferentes tipos de dispositivos de ancoragem, além de ancoragens retas. Os prismas foram ensaiados utilizando-se uma gaiola de reação que impede rotações, garantindo que os esforços atuantes nos corpos-de-prova fossem predominantemente de tração. São apresentadas as forças e modos de ruína, além dos padrões de fissuração observados. Os resultados experimentais mostraram que os prismas com ancoragem adicional apresentaram resistências últimas superiores aos dos prismas com ancoragem reta, sendo que para estes verificou-se que à medida que os comprimentos de ancoragem reta eram aumentados, os valores de tensão tenderam a se igualar em aproximadamente 1,0 MPa. Os sistemas adicionais para melhorar o desempenho das ancoragens retas aumentaram a eficiência dos reforços em até 88 %.

Palavras-chave: Ancoragem, CFRP, Fibra de Carbono.

Abstract

This paper evaluates the experimental behavior of anchorage system for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) as structural strengthening. Tests on 13 specimens were carried out using different types of anchorage system, besides straight anchorages. All proofs were tested using a reaction cage to avoid rotations, guaranteeing predominantly tensile forces on the proofs. Yielding loads, failure loads and modes, besides cracking patterns are presented and analyzed. Experimental results showed that the specimens with additional anchorage presented greater final strength than those with straight anchorage, and for these specimens while the straight anchorage lengths were increased the stress values tended to be equal to 1,0 MPa. The additional systems to improve performance of straight anchorages increased the strengthening efficiency up to 88 %.

Key words: Anchorage, CFRP, Carbon Fiber.

1. Introdução

Com a ampla aplicação do CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) no reforço de estruturas de concreto armado torna-se necessário o aprimoramento das ancoragens destes sistemas a fim de aperfeiçoar a utilização do material compósito, solicitando-o ao máximo. A necessidade de reforço ou recuperação estrutural geralmente ocorre quando a estrutura, ou parte dela, apresenta desgaste natural, falhas de projeto ou de execução e excesso de carregamento, dentre outros fatores. Este sistema de reforço é basicamente composto por três componentes: o *primer* epóxico, o epóxi estruturante e a manta de fibra de carbono. O *primer* tem como função estabelecer a ponte de ligação entre a superfície do substrato e o reforço estrutural. Já o epóxi estruturante viabiliza a transmissão de esforços entre as fibras de carbono, além de proteger as mesmas de agressões do meio. As fibras de carbono são responsáveis pela resistência e rigidez do material compósito, sendo que a capacidade resistente se dá pela ligação carbono-carbono e é máxima na direção da orientação das fibras. Características deste tipo de reforço como o baixo peso e a alta resistência e rigidez, agregam diversas vantagens a este sistema em relação às chapas e barras metálicas. Beber (*in* Machado, 2004) apresenta que para um mesmo incremento de resistência, 2,0 kg deste material compósito poderiam substituir 47 kg de aço.

Uma vez que são encontrados na literatura trabalhos onde a capacidade resistente de reforços estruturais com CFRP foram comprometidas por falhas na ancoragem, se faz necessário estudar que mecanismos de ancoragem proporcionariam melhores desempenhos aos reforços. De acordo com Chahrour e Soudki (2005), em elementos estruturais de concreto armado predominantemente sujeitos à flexão, por exemplo, mecanismos de ancoragem eficientes proporcionam menores deslocamentos e deformações na armadura longitudinal, quando comparados a elementos sem ancoragem adicional. Este comportamento também foi observado por Toutanji *et al.* (2006) e Rocha (2006) experimentalmente. Visando contribuir para a obtenção de parâmetros que melhorem o entendimento dos mecanismos de ancoragem dos sistemas que utilizam CFRP, este trabalho apresenta resultados da análise experimental de 13 corpos-de-prova prismáticos de concreto com diferentes dispositivos e comprimentos de ancoragem, observando-se e comparando-se os padrões de fissuração, modos e forças de ruína, principalmente, com os resultados encontrados na literatura.

2. Características dos materiais

2.1 Fibra de Carbono

O sistema de reforço utilizado foi o MFC – 130, sendo que as propriedades apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3 para a manta de fibra de carbono, resina epóxica estruturante e primer epóxico, respectivamente, foram retiradas do catálogo técnico do fabricante, fornecido pela empresa Rogertec Ltda., distribuidora do sistema no Brasil. O aspecto da manta de fibra de carbono é mostrado na Figura 1. As fibras que compõem o sistema de reforço são orientadas em uma única direção e possuem as propriedades apresentadas na

Tabela 1. Nesta tabela estão as principais vantagens físicas e mecânicas do material, como o baixo peso próprio e a elevada resistência à tração. O processo de obtenção das fibras de carbono se dá a partir da carbonização de fibras de polímeros como o poliacrilonitrila. Já as características mecânicas irão depender da estrutura molecular obtida ao final do processo e, dependendo do tipo de fibra polimérica carbonizada inicialmente, as propriedades mecânicas também podem variar consideravelmente. Observa-se na figura 2 que alguns tipos de fibra comumente utilizados são mais resistentes que o aço, além de apresentarem comportamento elástico até a ruptura, que pode ser caracterizada como frágil. Esta característica é repassada ao elemento estrutural. O patamar de escoamento não é definido, como no caso do aço.

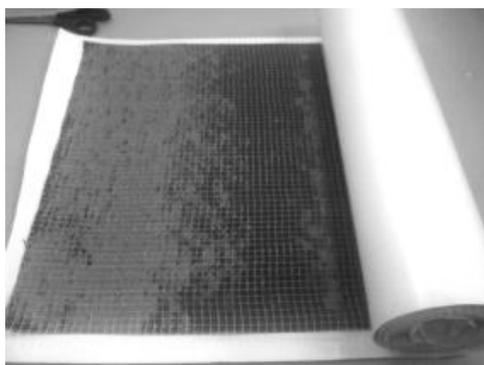


Figura 1: Fibra de carbono.

Tabela 1: Propriedades da fibra de carbono.

| Propriedade | Fibra tipo MFC – 130 |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Característica | Alto poder de tração |
| Densidade da fibra | 1,82 g/cm ³ |
| Largura | 500 mm |
| Resistência à tração | 3,55·10 ³ MPa |
| Módulo à tração | 2,35·10 ⁵ MPa |
| Espessura | 0,165 mm |
| Relação densidade/peso/área | 300 g/m ² |
| Alongamento último | 1,5 % |

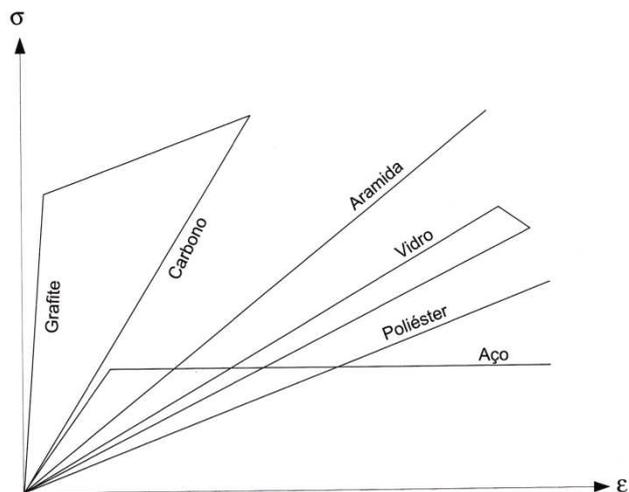


Figura 2: Comparação entre diversos tipos de fibra e o aço (Machado, 2002).

2.2. Resina epóxica estruturante

As resinas epóxicas utilizadas neste tipo de reforço são dos grupos epoxílicos derivados da epícloridrina e do bisfenol A. A formulação deste material pode garantir, dentre outras propriedades importantes, resistência à tração de 57 MPa e resistência à compressão de 81 MPa, mas estes valores podem variar até 90 MPa e 210 MPa, respectivamente. Na Tabela 2 são apresentadas as principais características da resina epóxica utilizada nos prismas ensaiados.

Tabela 2: Propriedades do epóxi estruturante.

| Propriedade | Epóxi estruturante |
|--------------------------|-----------------------|
| Resistência a tração | 57 MPa |
| Deformação na tração | 2,4 % |
| Módulo à tração | $2,99 \cdot 10^3$ MPa |
| Resistência à flexão | 131 MPa |
| Módulo à flexão | $3,68 \cdot 10^3$ MPa |
| Resistência à compressão | 81 MPa |
| Módulo à compressão | $2,56 \cdot 10^3$ MPa |

2.3. Primer epóxico

Uma etapa fundamental para o bom desempenho do reforço é a aplicação do *primer* epóxico. Após limpeza da superfície do elemento estrutural aplica-se o *primer*, que é o material responsável pela ponte de aderência entre o substrato de concreto e a resina de saturação (epóxi estruturante). O *primer* é composto por epóxi-poliamina curada, bicomponente, de baixa viscosidade e com 100 % de sólidos. Na tabela 3 são apresentadas as principais características do *primer* utilizado, de acordo com as recomendações do fabricante.

Tabela 3: Propriedades do primer epóxico.

| Propriedade | Primer epóxico |
|--------------------------|-----------------------|
| Resistência a tração | 12 MPa |
| Deformação na tração | 1 a 3 % |
| Módulo à tração | 687 MPa |
| Resistência à flexão | 26 MPa |
| Módulo à flexão | 57 MPa |
| Resistência à compressão | 20 MPa |
| Módulo à compressão | 619 MPa |

3. Programa experimental

3.1 Concretos

Os concretos utilizados na moldagem dos prismas foram dosados em central e foram realizadas duas concretagens. Na primeira concretagem foram confeccionados todos os prismas do Grupo II. O mesmo traço de concreto foi utilizado na confecção dos prismas da segunda etapa, onde foram confeccionados todos os prismas do grupo I. Foram ainda confeccionados, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2008), 9 corpos-de-prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) em cada concretagem, sendo 3 para os ensaios de tração por compressão diametral, 3 para os de compressão axial e 3 para os de módulo de elasticidade.

O cimento utilizado na dosagem dos concretos foi o Portland CII-Z 32 (com adição pozolânica), como agregado graúdo foi utilizado o seixo rolado, típico da Região Norte do Brasil, com granulometria 19 mm e como agregado miúdo utilizou-se a areia comum, classificada geralmente como fina ou muito fina, com diâmetro máximo de 2,4 mm. A desmoldagem dos prismas ocorreu após 48 horas de suas respectivas concretagens. O processo de cura foi realizado em câmara úmida onde todos os prismas permaneceram por, no mínimo, 28 dias.

3.2 Características dos prismas

Treze (13) prismas de concreto com dimensões de 120 mm x 150 mm x 300 mm foram confeccionados e ensaiados até a ruptura no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará. Todos os prismas receberam duas camadas de tecido de fibra de carbono com largura (b_{fc}) de 50 mm. As principais variáveis foram os comprimentos de ancoragem e os dispositivos mecânicos propostos para melhorar o desempenho das ancoragens retas. Para os prismas com ancoragens retas, os comprimentos colados de CFRP variaram de 70 mm a 250 mm. Para os prismas onde foram introduzidos incrementos de ancoragem, o comprimento colado l_{bfc} foi fixado em 250 mm. A colagem das faixas de fibra de carbono foi realizada afastando-se as mesmas 20 mm das bordas dos prismas. Este procedimento foi adotado para evitar que durante o processo de cura o epóxi estruturante escorresse e mudasse a orientação do reforço, além de evitar o surgimento de um potencial plano de corte que levaria à ruptura precoce do reforço.

Os prismas foram então divididos em dois grupos: o Grupo I apresentou 8 prismas com apenas ancoragens retas, e o Grupo 2 foi formado por 5 prismas com ancoragem adicional. Os dispositivos de ancoragem propostos foram compostos por faixas de fibra de carbono em forma de "U", disposto sobre o comprimento de ancoragem reto, e barras de aço fixadas com adesivo epóxi Sikadur 32 em sulcos executados no substrato, sobre o reforço de CFRP. Os raios de abaulamento, ou seja, do arredondamento nos cantos dos sulcos, tinham como função aliviar o acúmulo de tensões nas arestas e variaram de 13 a 52 mm, para permitir avaliar a influência dos mesmos no comportamento das ancoragens caso o menor raio viabilizasse o seccionamento por corte do reforço nesta região. O aspecto destes raios de abaulamento é mostrado na Figura 3. As Figuras 4 e 5 mostram as características dos prismas dos grupos I e II, respectivamente. Na Tabela 4 são apresentadas as principais características dos prismas ensaiados.

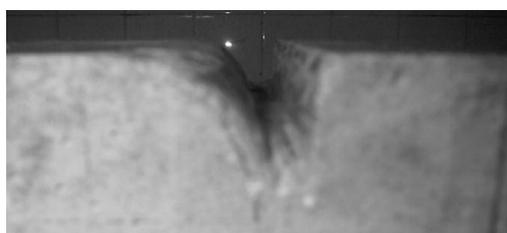


Figura 3: Abaulamento nas arestas dos sulcos.

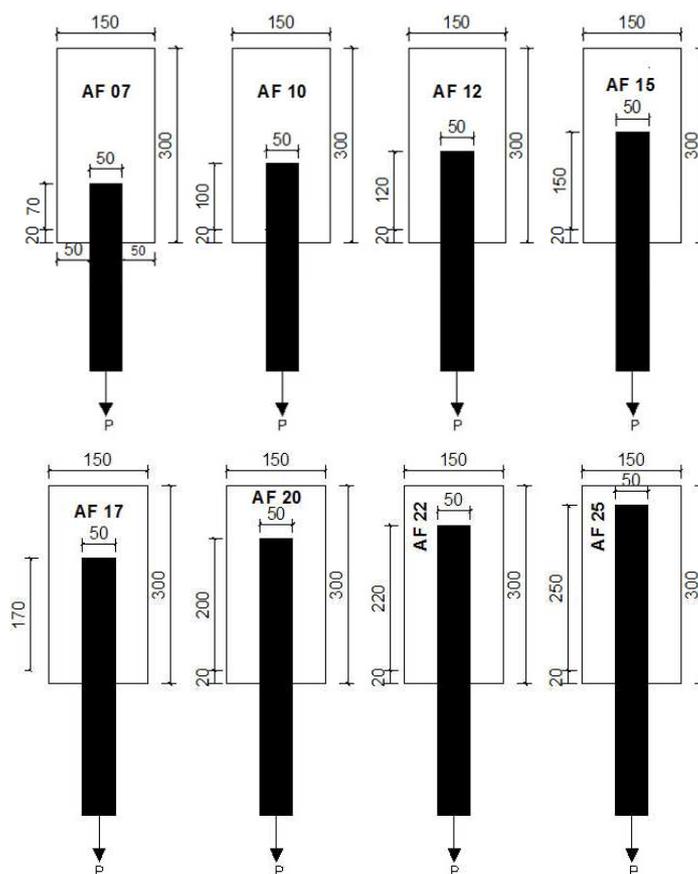


Figura 4: Prismas do Grupo I.

como mostrado na Figura 6. Em seguida, preparou-se o *primer* epóxico na proporção 5:1, de acordo com as recomendações do fabricante. Após a mistura e homogeneização o material foi então aplicado nos prismas com o auxílio de um rolo de espuma com a mesma largura da faixa de fibra a ser colada, como mostrado na Figura 7. Após aproximadamente 3 horas o *primer* atingiu a viscosidade ideal e a primeira camada de epóxi estruturante, preparada na proporção 1:1, novamente segundo as recomendações do fabricante, pôde ser aplicada, de acordo com a Figura 8. Logo em seguida, a primeira camada de fibra de carbono foi posicionada. Este procedimento foi repetido de acordo com o número de camadas do reforço, como mostrado na figura 9. Os prismas foram mantidos em processo de cura por sete dias, conforme recomendações do fabricante, e somente após este período os mesmos foram ensaiados.

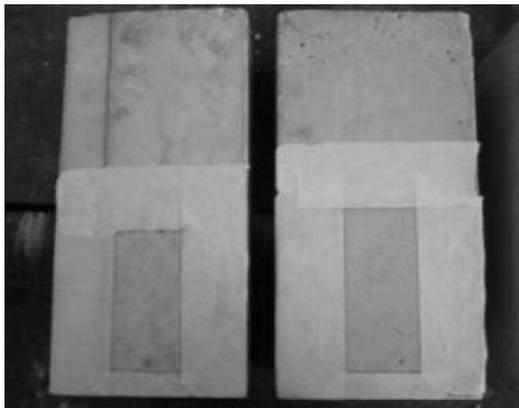


Figura 6: Prismas antes do reforço.



Figura 7: Aplicação do primer.



Figura 8: Aplicação do epóxi estruturante.



Figura 9: Aplicação da segunda camada de fibra.

Após a colagem das faixas de fibra de carbono para ancoragem reta, iniciou-se a execução dos dispositivos de incremento de ancoragem. As faixas que envolveram os prismas, formando um "U", foram fixadas de acordo com o processo já descrito nas Figuras de 6 a 9. Estes dispositivos apresentaram número e posições das camadas de fibra variados, como mostra a Figura 10. Para os prismas com barras de aço fixadas e imersas em adesivo epóxico foram confeccionados sulcos no substrato para melhorar a ancoragem das faixas de fibra de carbono. Em seguida, foi preparado o adesivo epóxico com o auxílio de uma espátula e de uma placa metálica de base, como mostrado na Figura 11.

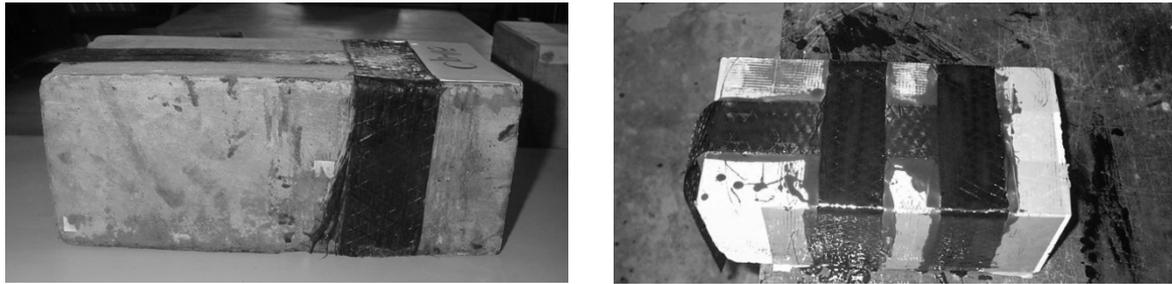


Figura 10: Detalhes dos reforços dos prismas do Grupo II.

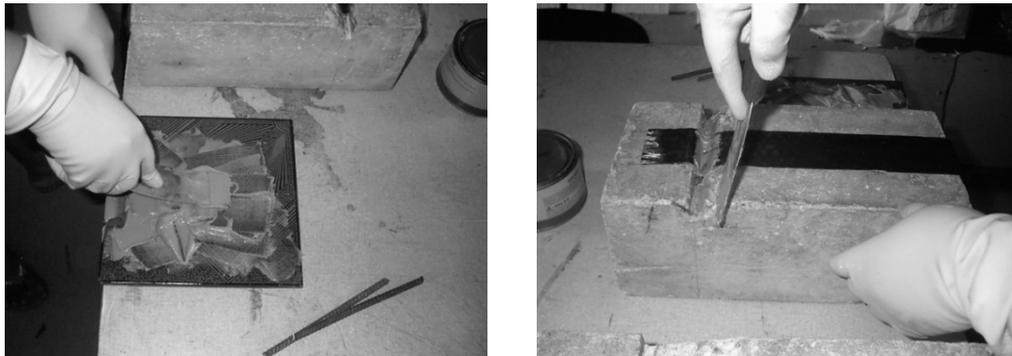


Figura 11: Preparo e aplicação do epóxi Sikadur 32 no sulco para receber barra de aço.

As barras de aço CA 50 com diâmetros de 6,3 mm foram então fixadas nos sulcos. Ressalta-se novamente que os raios de abaulamento dos sulcos variaram de 13 a 52 mm. A fundamentação experimental para a confecção de diferentes raios de abaulamento foi o trabalho de (Rocha, 2006), onde o autor observou que, em algumas de suas vigas reforçadas, o reforço à flexão rompeu nas proximidades das regiões dos sulcos com raios de abaulamento semelhantes aos executados neste trabalho. Ainda segundo o autor, a suavidade na mudança de direção do reforço influencia sobremaneira no comportamento da ancoragem, dissipando ou concentrando tensões nesta região.

3.4 Sistema de ensaio

Após o período de cura do reforço estrutural foram realizados os ensaios em laboratório. O sistema de ensaio utilizado foi basicamente constituído de uma gaiola metálica de reação e uma garra para arrancamento do reforço, como mostrado na Figura 12. Os prismas foram posicionados dentro da gaiola de reação mostrada na Figura 13, que apresenta a principal característica de evitar rotações, de forma que as faixas de fibra de carbono atravessassem a abertura na placa de fundo para, posteriormente, serem tracionadas com o auxílio da garra metálica mostrada na Figura 14. Esta garra pode ser devidamente regulada com parafusos para evitar o escorregamento da fibra durante os ensaios.

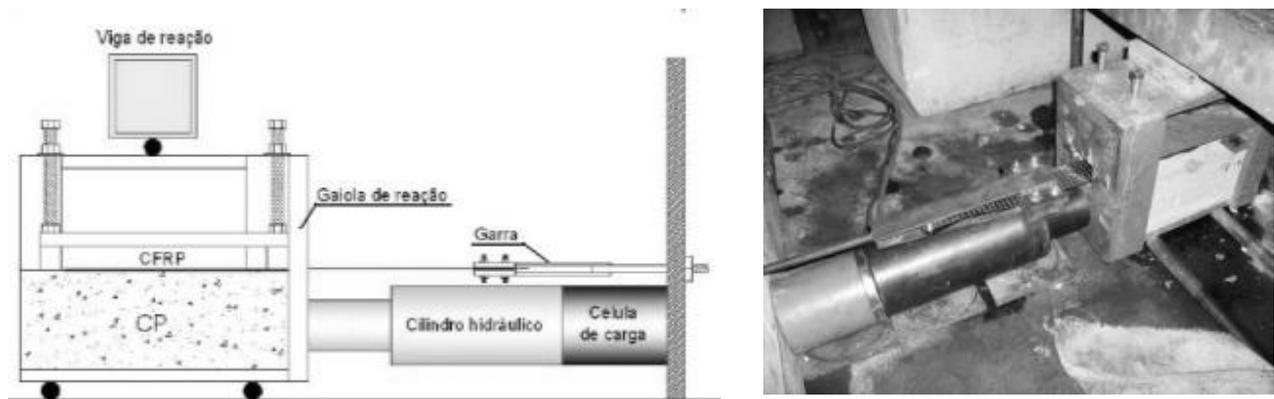


Figura 12: Sistema de ensaio.



Figura 13: Gaiola metálica de reação.



Figura 14: Garra metálica.

O carregamento foi aplicado através de um cilindro hidráulico com capacidade para 1.000 kN, acionado por uma bomba hidráulica de igual capacidade. O carregamento foi medido com o auxílio de uma célula de força de 0,5 kN de precisão, conectada a uma leitora digital. Ao acionar o cilindro a gaiola era deslocada e os esforços eram transmitidos ao sistema de reforço, tracionando a fibra de carbono e comprimindo o bloco prismático de concreto. O sistema de ensaio mostrou-se estável e tomou-se apenas o cuidado de se verificar o nivelamento da fibra de carbono com a garra metálica para que os esforços não mudassem de direção.

4. Resultados

4.1 Concretos

Os ensaios de compressão axial foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), tendo como resultado médio 39 MPa para a primeira concretagem e 43,0 MPa para a segunda concretagem. O valor médio para os ensaios de tração foi 3,0 MPa para a primeira concretagem e 2,4 MPa para a segunda concretagem.

4.2 Reforços

As áreas de fibra de carbono (A_{fc}) aderidas ao substrato, o comprimento de ancoragem (l_{bfc}), as forças observadas na ruína (F_u) e as tensões últimas de aderência (σ_u) para cada prisma estão apresentadas nas tabelas 5 e 6, e na figura 15, respectivamente. Observou-se com os resultados experimentais que à medida que se aumentava os comprimentos de ancoragem nos prismas com ancoragem reta, as tensões de aderência diminuía, chegando a ser 66 % menor entre o prisma AF 07 e o AF 25. A justificativa encontrada é que as tensões de aderência não se distribuem ao longo do comprimento de ancoragem, mas se concentram na extremidade do reforço, como mostra a Figura 16. Quanto ao comprimento do trecho mais solicitado, ainda existem divergências na literatura, mas não é raro encontrar trabalhos sugerindo o comprimento de 100 mm. Porém, à medida que os dispositivos de ancoragem foram introduzidos, conseguiu-se elevar as tensões em até 88 % em relação aos prismas com o mesmo comprimento de ancoragem, sem dispositivos adicionais.

Nakaba *et al.* (2001) afirmam que, como a força de tração dos CFC é transferida ao concreto, não existe tensão de aderência entre as regiões descoladas. Isso significa que quando o comprimento de aderência excede a um comprimento crítico (igual ao comprimento de aderência efetivo) da ordem de 100 mm, a carga de fratura permanece constante. Estas conclusões ratificam os resultados encontrados na Tabela 5 e Figura 15, mostrando que as cargas mantiveram-se constantes à medida que se aumentava o comprimento de ancoragem.

Tabela 5: Áreas e comprimentos de ancoragem.

| Grupo | Prisma | A_{fc} (mm ²) | l_{bfc} (mm) |
|-----------|--------|--------------------------------|-------------------|
| I | AF 07 | 3.500 | 70 |
| | AF 10 | 5.000 | 100 |
| | AF 12 | 6.000 | 120 |
| | AF 15 | 7.500 | 150 |
| | AF 17 | 8.500 | 170 |
| | AF 20 | 10.000 | 200 |
| | AF 22 | 11.000 | 220 |
| | AF 25 | 12.500 | 250 |
| | II | AF25US | 12.500 |
| AF25UD | | 12.500 | 250 |
| AF25BA-13 | | 12.500 | 250 |
| AF25BA-26 | | 12.500 | 250 |
| AF25BA-52 | | 12.500 | 250 |

Tabela 6: Forças e tensões últimas.

| Grupo | Prisma | F_u (N) | σ_u (MPa) |
|-----------|--------|--------------|---------------------|
| I | AF 07 | 10.500 | 3,00 |
| | AF 10 | 8.000 | 1,60 |
| | AF 12 | 10.000 | 1,67 |
| | AF 15 | 11.000 | 1,47 |
| | AF 17 | 13.000 | - |
| | AF 20 | 12.000 | 1,20 |
| | AF 22 | 11.500 | 1,05 |
| | AF 25 | 12.500 | 1,00 |
| | II | AF25US | 15.000 |
| AF25UD | | 23.500 | 1,88 |
| AF25BA-13 | | 17.500 | 1,40 |
| AF25BA-26 | | 13.500 | 1,08 |
| AF25BA-52 | | 17.500 | 1,40 |

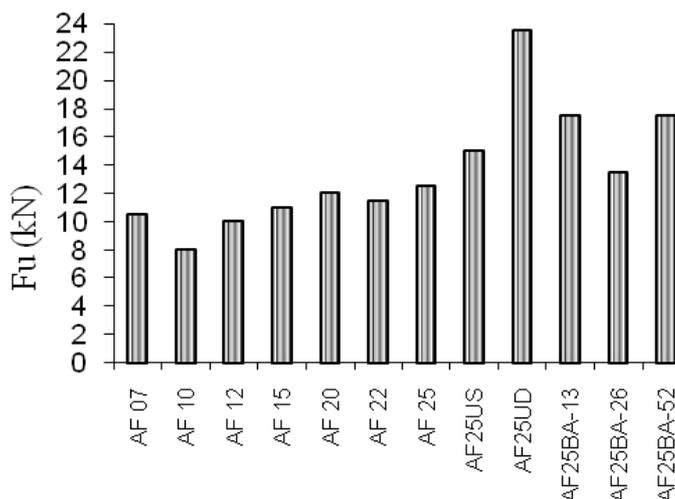


Figura 15: Forças de ruptura observadas.

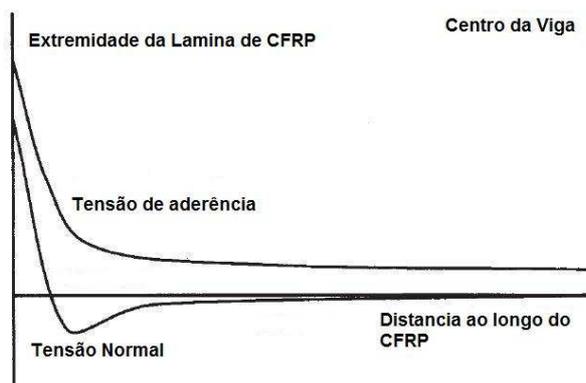


Figura 16: Distribuição das tensões de aderência e normais (adaptado de ACI, 2003).

Observou-se que em todos os prismas a ruína se deu na extremidade do laminado, destacando o concreto nesta região, pelo fato do mesmo apresentar-se como o componente mais frágil do sistema. Chen e Teng (2001) observaram que existem seis distintos modos de falha para os laminados utilizando compósitos, e dentre estes modos tem-se a falha na interface concreto/adesivo, que ocorre devido à concentração de tensões tangenciais nesta interface.

Na Tabela 7 são apresentados os modos de ruptura observados nos ensaios, e nas Figuras 17 e 18 são mostrados aspectos dos prismas do grupo I e II, respectivamente. Segundo Chajes *et al.* (in Meneghel, 2005) devido à esta redução da tensão média de aderência com o aumento do comprimento de ancoragem, se faz necessário confirmar a segurança do CFRP, ou buscar um comprimento de aderência adequado para evitar a ruína brusca ou do tipo frágil. Este modo de ruína foi observado em todos os prismas ensaiados e apresentados neste trabalho. Não há um regime de escoamento, simplesmente o CFRP rompe e a capacidade resistente cai bruscamente.

Tabela 7: Modos de ruptura observados.

| Grupo | Prisma | Modos de Ruptura |
|-------|-----------|--|
| I | AF 07 | Descolamento da fibra com arrancamento do concreto |
| | AF 10 | Descolamento da fibra com arrancamento do concreto |
| | AF 12 | Descolamento da fibra com arrancamento do concreto |
| | AF 15 | Descolamento da fibra com arrancamento do concreto |
| | *AF 17 | Ruptura da fibra ocasionada pelo atrito contato com a gaiola |
| | AF 20 | Descolamento da fibra com arrancamento do concreto |
| | AF 22 | Descolamento da fibra com arrancamento do concreto |
| | AF 25 | Descolamento da fibra com delaminação no final da ancoragem |
| Grupo | Prisma | Modos de Ruptura |
| II | AF25US | Ruptura da Ancoragem |
| | AF25UD | Ruptura da Ancoragem |
| | AF25BA-13 | Ruptura da Ancoragem |
| | AF25BA-26 | Ruptura da Ancoragem |
| | AF25BA-52 | Ruptura da Ancoragem |



Figura 17: Prismas do Grupo I após os ensaios.



Figura 18: Aspecto dos prismas do Grupo II após os ensaios.

Para tracionar as faixas de fibra de carbono durante os ensaios, inicialmente as duas chapas extremas da garra receberam uma camada de resina epóxi do tipo Araldite 10 minutos em suas faces internas. As faixas de fibra foram então posicionadas entre estas chapas e o aperto era regulado através dos

parafusos, como mostra a Figura 19. Durante os ensaios o prisma AF 17 teve o CFRP seccionado precocemente devido ao atrito com a borda do furo localizado na chapa de fundo da gaiola de reação. O valor observado para a força aplicada no momento do seccionamento do reforço foi anteriormente apresentado na Tabela 6.

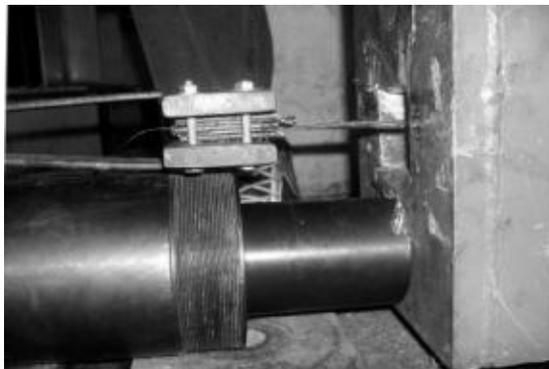


Figura 19: Detalhe da Garra metálica tracionando a fibra de carbono.

De acordo com Neubauer e Rostasy (*in* Meneghel, 2005) os valores muitas vezes utilizados para os comprimentos de ancoragem podem ser demasiadamente longos, e podem não colaborar com a capacidade resistente do reforço. Os autores propõem que, para a obtenção do comprimento de ancoragem efetivo, seja utilizada a equação 1. Na equação $l_{t,max}$ é o comprimento de ancoragem máximo, E_f é o módulo de elasticidade do CFRP, t_f é a espessura do CFRP e f_{ctm} é a resistência a tração média da superfície de concreto. O gráfico tensão última versus comprimento de ancoragem para os prismas do Grupo I é mostrado na figura 20, onde se percebe claramente que quando os comprimentos de ancoragem aumentam as tensões de aderência diminuem, ratificando que para grandes comprimentos de ancoragem não se consegue atingir a tensão máxima de aderência.

$$l_{t,max} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad (1)$$

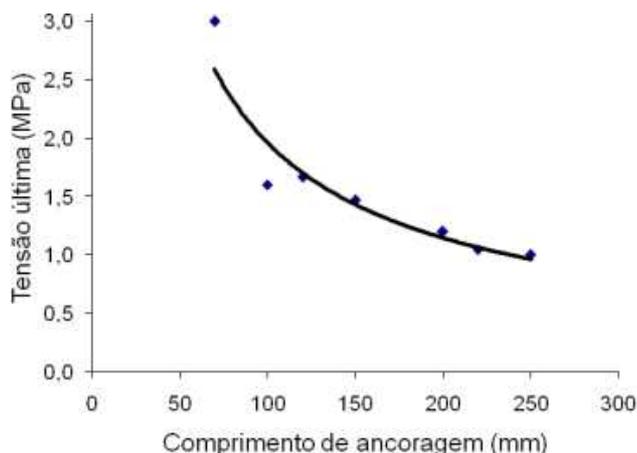


Figura 20: Resultados dos ensaios para o grupo I.

Hiroyuki e Wu (1997) desenvolveram uma equação relacionando o comprimento de ancoragem com a tensão de aderência para arrancamento de laminados de CFRP. Com base nos dados obtidos experimentalmente e apresentados neste trabalho, formulou-se uma equação semelhante, relacionando-se os mesmos parâmetros, e verificou-se a coerência entre os resultados observados pelos autores (curva inferior) e os atuais (curva superior). Estes resultados também comprovam o desempenho do sistema de ensaio adotado que, além de bastante simples, pode ser acoplado em máquinas universais para a realização de diversos tipos de ensaio. Assim, propõe-se uma equação que representaria a média dos valores observados, como mostrado na Figura 21.

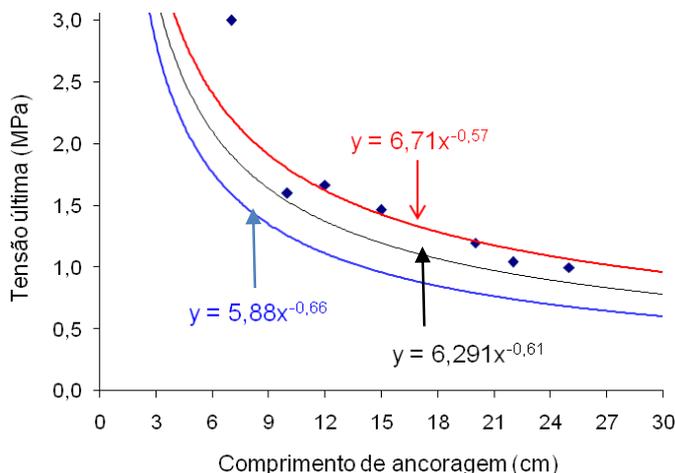


Figura 21: Proposta para dimensionamento de ancoragens retas de CFRP.

5. Conclusões

Foram apresentados os resultados dos ensaios de 13 prismas de concreto com reforços de CFRP apresentando diferentes comprimentos e tipos de ancoragem. Verificou-se que à medida que o comprimento de ancoragem aumentava a tensão de aderência diminuía, tendendo a se estabilizar em torno de 1,0 MPa, mas ensaios adicionais são necessários para confirmar este valor. Estes resultados, corroborados pelos de outros pesquisadores, indicam que os reforços com CFRP apresentando comprimentos de ancoragens retos podem ser dimensionados em função da tensão de aderência, e que o aumento sem o devido controle do comprimento de ancoragem pode resultar em desperdício de material. Os dispositivos de ancoragem adicionais mostraram-se eficientes, aumentando em até 88 % a tensão de aderência do sistema de reforço. Destaca-se o fato destes sistemas não circundarem os prismas, ou seja, no reforço de uma viga, por exemplo, não haveria a necessidade de perfurar lajes ou paredes para aumentar significativamente a tensão de aderência. Entretanto, verificou-se que estes dispositivos precisam ser melhorados, podendo apresentar desempenhos superiores. O sistema de ensaio, desenvolvido na UFPA especificamente para ensaios excêntricos de arrancamento, mostrou-se adequado para ensaios de cisalhamento da ponte de aderência de laminados de CFRP sobre superfícies de concreto, podendo a gaiola de reação ser acoplada a máquinas universais de ensaio.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, FAPESPA e ao CNPq pelo incentivo financeiro para a pesquisa.

Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, ACI 440 2R 02. 2003. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. USA 2003, 29 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 2007. *NBR 5739: Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 2008. *NBR 5738: Moldagem e cura de Corpos-de-prova Cilíndricos ou Prismáticos de Concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 9 p.
- CHAHROUR, A.; SOUDKI, K. 2005. Flexural response of reinforced concrete beams strengthened with endanchored partially bonded carbon fiber reinforced polymer strips. *Journal of Composites for Construction*, **9**(2):170-177.
- CHEN, J.F.; TENG, J. G. 2001. Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete. *Journal of Structural Engineering*, **127**(7):784-791.

- HIROYUKI, Y.; WU, Z. 1997. Analysis of debonding fracture properties of CFS strengthened member subject to tension. *In: III International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Sapporo, 1997. Anais...* Sapporo, Japan Concrete Institute, 1997, p. 287-294.
- MACHADO, A.P. 2002. *Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono*. São Paulo, Pini, 281 p.
- MACHADO, M.G. 2004. *Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas a flexão utilizando compósitos com tecidos de fibras de carbono*. Rio de Janeiro, RJ. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 301 p.
- MENEGHEL, J.M. 2005. *Análise Experimental da Aderência entre o Concreto e Compósitos com Tecidos de Fibra de Carbono*. Rio de Janeiro, RJ. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 203 p.
- NAKABA, K.; KANAKUBO, T.; FURUTA, T.; YOSHIZAWA, H. 2001. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete. *ACI Structural Journal*, **98**(3):359-367.
- ROCHA, D.C. 2006. *Análise experimental de sistemas de ancoragem para vigas reforçadas a flexão com material compósito de fibra de carbono*. Belém, PA. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, 182 p.
- TOUTANJI, H.; ZHAO, L.; ZHANG, Y. 2006. Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. *Journal of Engineering Structures*, **28**:557-566.

Submissão: 30/12/2008
Aceite: 16/04/2009