Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

REFORÇO COM MANTA DE FIBRA DE CARBONO EM DIFERENTES LARGURAS: DESEMPENHO A FLEXÃO DE CONCRETO COM ALTO TEOR DE FIBRAS DE AÇO

J. L. ALVES JUNIOR
Téc. Edificações, Graduando Eng. Civil CEFET/RJ
Prefeitura dos Campi - UERJ
Rio de Janeiro; Brasil
jorgeluizalvesjr@globo.com

A. F. CODÁ DOS SANTOS
Engenheiro Civil, M. Sc., Doutorando UFF
Professor Departamento de Eng. Civil - CEFET/RJ
Rio de Janeiro; Brasil
coda.engenharia@uol.com.br

RESUMO

O envelhecimento das estruturas em concreto armado sem a devida manutenção, seu mal-uso, ou mesmo falhas no projeto e execução, geram diversas manifestações patológicas que podem reduzir a capacidade portante. Desde os anos 1970, a utilização de fibras diversas (como fibras de aço, polietileno ou vidro) na massa de concreto para redução de certos comportamentos indesejados, tais como a fissuração, ou como compósitos, para aplicação em concreto endurecido, é pesquisada e sua utilização cada vez mais disseminada. Já as fibras de carbono, nas diversas apresentações existentes no mercado (quer como tecido ou laminados), são amplamente utilizadas como reforço estrutural, pois apresentam como vantagem, em comparação aos métodos tradicionais utilizados em reforço estrutural (chapas metálicas ou aumento da seção da peça com inclusão de barras de aço complementares), maior flexibilidade e conformação às peças estruturais, menor peso, altas resistências iniciais e, especialmente, aumento mínimo de seção da peça a reforçar. Sua principal desvantagem é o preço elevado do material e baixa resistência do polímero ao fogo. Nesse trabalho, buscou-se estudar a resistência à tração na flexão de corpos de prova de concreto na forma prismática com incorporação de elevados percentuais de fibra de aço em sua massa (92,7 kg/m³) e posterior aplicação de tecido de fibra de carbono com diversas larguras em relação à base desses prismas, bem como uma análise do ganho de resistência em relação ao custo do tecido de fibra de carbono.
Foram realizados ensaios de tração na flexão com três pontos nesses corpos de prova prismáticos. Os mesmos foram reforçados com tecido de fibra de carbono no trecho tracionado. Realizaram-se também ensaios de compressão axial em corpos de prova cilíndricos. Obtiveram-se resultados que comprovam o aumento de resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos quando relacionados à largura de fibra aplicada, notando-se que a largura de polímero reforçado com fibras de carbono cujo desempenho econômico foi considerado mais adequado, quando comparado ao ganho de resistência, foi aquele que cobriu 60% da base desses corpos de prova prismáticos. Além desses, observou-se também uma perda na resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos.
Palavras-Chave: fibras, carbono, aço, reforço.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures aging without the correct maintenance, its misuse, flaw at design or execution, creates several pathologies that can reduce the structures support capacity. Since 1970's, the use of diverse fibers (such as steel, polyethylene or glass fibers) in the concrete mix to reduce unwanted behaviors, such as cracking, or as composites to be use on hardened concrete are researched and their use more disseminate. In the other hand, Carbon Fibers on their diverse forms (plates or fabric), are widely spread as structural reinforcement, because they present as advantage, compared to the traditional reinforcement methods, higher flexibility and easier application on structural elements, lighter, high initial resistance and minimum increase of section size. The main disadvantage is the high cost of carbon fibers. This paper intent to stud the behavior of prismatic concrete pieces reinforced with high content of steel fibers and, after, carbon fiber fabric. Tests to measure its flexural strength were made with three points and axial compression on cylindrical test specimens. The results obtained show the increase of flexural strength resistance with different sizes of carbon fiber fabric. The compressive resistance from the cylindrical specimens presented a decrease. A comparison of resistance gains and cost of the solution was, also analyzed.
Keywords: fibers, carbon, steel, reinforcement.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é uma das soluções estruturais mais adotadas no mundo. Tal deve-se a excelente interação entre ambos elementos, aço e concreto, a durabilidade dessas construções, baixo custo e facilidade de execução. Diversos estudos apontam que após a água, o cimento Portland é o material mais consumido no planeta.

Contudo, estruturas de concreto armado não possuem vida útil ilimitada, tampouco estão imunes à ação de elementos deletérios ou mal-uso. A falta de programas de manutenção que visem combater ou prevenir o ataque de agentes nocivos aos componentes do concreto armado, usos não previstos das estruturas, acidentes, falhas de projeto ou execução demandam a utilização de técnicas de reparo ou reforço dessas estruturas.

Fissuras, por exemplo, são imensamente nocivas às estruturas de concreto armado, pois tornam-se canal de fácil entrada para gases e águas nocivas que geram corrosão nas armaduras. Tal processo corrosivo agravará a fissuração, pois o aço carbono, ao ser oxidado, aumenta significativamente de volume, expelindo parte do cobrimento do concreto, gerando um ciclo que culmina com a total corrosão das barras de aço e a consequente perda de sua função estrutural [1].

Um dos fatores fundamentais para atingir-se e, até mesmo, superar a vida útil estimada (pela NBR 15575:2013, a vida útil mínima das edificações será de cinquenta anos) de uma estrutura é a manutenção preventiva. Esse sistema de manutenção deve ser elaborado de modo a garantir um bom desempenho, através de manutenções preventivas periódicas, com o acompanhamento e cumprimento do planejamento, previsto no programa de manutenção preventiva [2].

Dessa forma, surge o conceito de Vida Útil Estrutural. Essa Vida Útil Estrutural está associada às condições de segurança e de utilização da estrutura, nomeadamente garantindo que não ocorram situações de colapso, deformações excessivas, entre outros. Assim, a Vida Útil Estrutural depende essencialmente da evolução das ações, dos materiais e manutenções preventivas e corretivas ao longo da vida da construção [3].

Construções duráveis, portanto, são aquelas nas quais desde a concepção do projeto, sua construção e uso foram ponderados fatores como agressividade ambiental, uso a que se destinam, vida útil, entre outros conceitos.

1.1 Recuperação e reforço estrutural

Quando os cuidados necessários à manutenção da vida útil do concreto armado não são dispensados em qualquer uma das fases (projeto, construção ou utilização), na ocorrência de acidentes ou má utilização, ocorre o surgimento de manifestações patológicas .

Essas patologias demandam algum tipo de intervenção para que se resguarde a segurança da construção e dos usuários. Dessa forma, após o devido diagnóstico, será necessária uma recuperação estrutural, na qual será reestabelecida a capacidade portante do elemento estrutural, ou um reforço estrutural, no qual se fará um incremento da capacidade portante do elemento estrutural, seu comportamento em operação ou estabilidade.

1.2 Pesquisa e utilização de fibras diversas

Nos anos de 1970, deu-se início às pesquisas para utilização de fibras diversas incorporadas ao concreto fresco. A utilização dessas fibras tem por meta incorporar melhorias em certas características indesejadas do concreto, como fissuração e retração.

O desenvolvimento do concreto reforçado com fibras de aço começou por volta do início dos anos 1960 e as fibras poliméricas começaram a ter um uso comercial em finais dos anos 1970. O uso de fibras de vidro teve um grande crescimento nos anos 1980 e as fibras de carbono atraíram grande interesse de aplicação no início da década de 1990 [4].

1.3 Conceito e tipos de fibras

Classificam-se como fibras os materiais, independentemente de forma, origem ou características, descontínuos cujo comprimento exceda em muitas vezes a maior dimensão de sua seção transversal [5].

Essas fibras podem ser produzidas com bases naturais ou sintéticas. Dentre aquelas utilizadas para reforço do concreto, há diversas pesquisas utilizando fibras de diferentes origens.

Nas pesquisas envolvendo fibras naturais citam-se como exemplo fibras de bambu e sisal, entre outras, muitas vezes com materiais reaproveitados ou rejeitos de outras indústrias que não a construção civil. Já entre as sintéticas há uma diversidade ainda maior como, por exemplo, fibras de poliéster, polipropileno, nylon, entre outras. Algumas dessas são utilizadas não para reforço da matriz de concreto endurecido, mas para melhoria na trabalhabilidade do concreto no estado fresco [4].

1.4 Fibras de carbono

Fibras de carbono são materiais altamente promissores, baseado na força das ligações carbono-carbono e na leveza do átomo de carbono [6].

A última geração de fibras de carbono é baseada no piche como matéria prima. O piche é uma matéria prima muito barata quando comparado ao Rayon e a PAN (matérias primas de primeira e segunda geração das fibras de carbono). Fibras de carbono com alta resistência e módulo são obtidas a partir do piche que tenha sido primeiramente convertido em cristal líquido [6].

De acordo com Machado [7], as fibras de carbono resultam do processo de carbonização de fibras de polímeros, como o poliacrilonitril, sendo suas características mecânicas diretamente dependentes da estrutura molecular obtida. Dependendo do tipo de tratamento da fibra básica que inclui carbonização, grafitização e oxidação, é possível fabricar fibras de carbono com diversas configurações de resistência e algumas delas podem chegar a ser várias vezes mais resistentes que o aço. A produção dessas fibras exige exposição ao ar das fibras base, seguida de processamento a altas temperaturas (da ordem de 1000°C a 1500°C para as fibras de carbono). Essa característica confere à fibra resistência à tração da ordem de 3500 MPa com uma deformação específica de 1,5%.

A matriz dos compósitos reforçados com fibras é responsável pela união das fibras que compõem o compósito, atuando como o meio pelo qual as solicitações externas são transmitidas e distribuídas para as fibras. Apenas uma parcela muito pequena desta solicitação é absorvida pela matriz. As resinas sintéticas estão entre os materiais mais empregados na recuperação e no reforço de estruturas. Essas resinas são formadas por monômeros, que ao reagirem com catalisadores formam polímeros de cadeias de grande extensão. As características desses polímeros variam de acordo com o monômero e o catalisador utilizados, e com as proporções desses para a formação dos polímeros [7].

Assim, os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) possuem inúmeras vantagens quando comparados aos reforços tradicionais, conforme o Quadro 1. Contudo, possuem, como qualquer material, algumas desvantagens. Dessas, destaca-se o alto custo dos compósitos de fibra de carbono (laminados, mantas ou tecidos).

Quadro 1 – Vantagens e Desvantagens PRFC [8]

Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC)	
Vantagens:	Desvantagens:
• Resistência à corrosão	• Sensibilidade à radiação ultravioleta
• Alta resistência à tração (sete vezes superior ao aço)	• Sensibilidade do adesivo às altas temperaturas
• Baixo peso específico	• Indução à ruina frágil pela redução da ductilidade da peça
• Flexibilidade	• Elevado custo do PRFC
• Produção em qualquer comprimento	
• Manutenção da seção original da peça	
• Liberação rápida com cura do adesivo em até quarenta e oito horas	

No trabalho de Sánchez Filho *et al.* [9], os autores apresentam um estudo de caso de recuperação estrutural em uma laje de teto e vigamento de uma garagem na cidade do Rio de Janeiro. Foi escolhida como técnica de recuperação e reforço dos elementos estruturais a utilização de PRFC, pois qualquer outra técnica diminuiria sobremaneira o pé direito do referido pavimento, o que impossibilitaria que se continuasse a utilizar o pavimento como garagem, já que a altura livre nesse pavimento já era bastante reduzida.

Figura 1: Reforço com PRFC em vigas e lajes de teto de garagem no Rio de Janeiro [9]



1.5 Fibras de aço

O concreto caracteriza-se por ser um material de matriz cimentícia. Nele, ocorrem processos de fissuração. Esses processos causam vários problemas que abrangem desde questões estruturais até patológicas do material [10].

Em nível mesoscópico o concreto possui duas fases que podem ser distinguidas facilmente, a dos agregados graúdos que são distribuídos em meio contínuo formado por uma pasta de argamassa. Em nível microscópico o concreto, já não apresenta somente duas fases, e sim três. A terceira fase recebe o nome de zona de transição. Essa região representa uma área interfacial entre as partículas de agregado graúdo e a pasta. Sendo uma camada delgada tipicamente de 10 a 50 µm de espessura ao redor do agregado graúdo, a zona de transição é geralmente a mais fraca entre todos os componentes do concreto e, consequentemente, exerce uma influência muito maior sobre o comportamento mecânico dele. Além disso, cada uma das fases é de natureza multifásica das quais cada partícula de agregado pode conter vários minerais, e também microfissuras e vazios [10], como se observa na Figura 2.

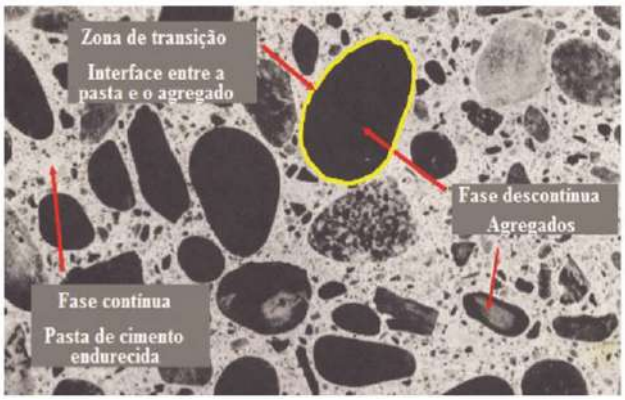


Figura 2: Microestrutura do concreto [10].

Portanto, a utilização de fibras de aço incorporadas à matriz cimentícia funciona como ponte para transmissão das tensões que ocorrem no interior da matriz cimentícia. Dessa forma, essas fibras de aço podem ajudar a controlar o processo de fissuração, além de conferirem ao concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) uma resistência residual

pós fissuração. Os teores comercialmente utilizados variam de 20 a 40 quilos de fibras de aço por metro cúbico de concreto, variando por tipos de fibra, fabricantes e resistências pós-fissuração desejadas.

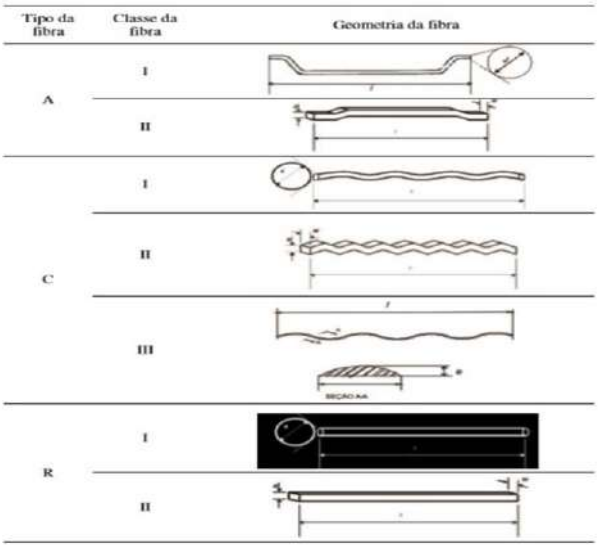


Figura 3: Tipos de Fibras [11].

A normatização das fibras de aço no Brasil foi criada no ano de 2007 através da NBR 15530:2007 [11], "Fibras de aço para concreto – Especificação". Nela foram estabelecidas os tipos de fibras de aço, suas características e ensaios específicos. Os diferentes tipos de fibra e sua nomenclatura encontram-se na Figura 3.

Ferrari [7] observa que, na prática de engenharia, observa-se que as estruturas a serem reforçadas não costumam apresentar condições técnicas adequadas para aplicação das técnicas de reforço, o que demanda recuperação estrutural prévia, como exemplificado na Figura 4.

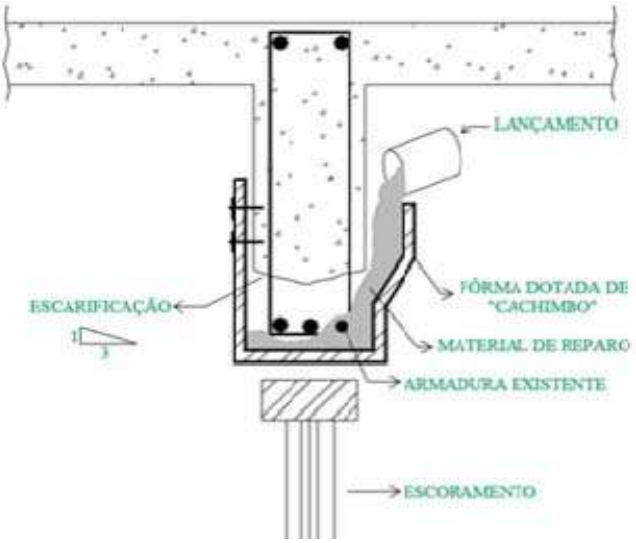


Figura 4: Aplicação de material de reparo em vigas (adaptado de Helene, 1992) [7].

2. MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

Considerando que o desprendimento prematuro é uma das principais limitações da técnica de reforço externo com PRFC e que esse desprendimento pode ser gerado pelo surgimento de grandes fissuras no banzo tracionado da viga, incorporou-se um alto teor de fibras de aço ao concreto fresco.

Com esse procedimento, buscava-se criar um CRFA que pudesse funcionar como substrato de transição em vigas de concreto armado, nas quais fosse recuperado o banzo tracionado, como exemplificado na Figura 3, supondo-se que o

substrato de transição pudesse controlar a fissuração do concreto de maneira a melhor explorar as propriedades resistentes do reforço de PRFC e da viga reforçada como um todo [7].

2.1 Escolha dos materiais

2.1.1 Fibras de Aço

Observando a orientação do trabalho de Figueiredo [12], esse autor afirma que, pela análise dos fatores de eficiência, quanto mais direcionadas as fibras estiverem em relação ao sentido da tensão principal de tração, melhor será o desempenho do compósito. Assim, o autor recomenda a utilização de fibras com comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado no concreto.

Portanto, utilizou-se uma fibra de aço com 60 mm de comprimento, do tipo AI, diâmetro de 0,75mm e fator de forma (λ) igual a 80. Dessa forma, na escolha das dimensões máximas do agregado graúdo utilizado, considerou-se a compatibilidade dimensional com a fibra de aço a ser utilizada. Um exemplar da fibra utilizada está exemplificado na Figura 5.

Esse tipo de fibra provém de arames de aço com baixo teor de carbono trefilados a frio, com ancoragem nas extremidades e limite de resistência à tração do aço de 1000 MPa.

As fibras de aço foram testadas quanto ao dobramento, dimensões e defeitos, estando a caixa com 20 kg em condições de uso, conforme previsto na NBR 15530:2007 [11].

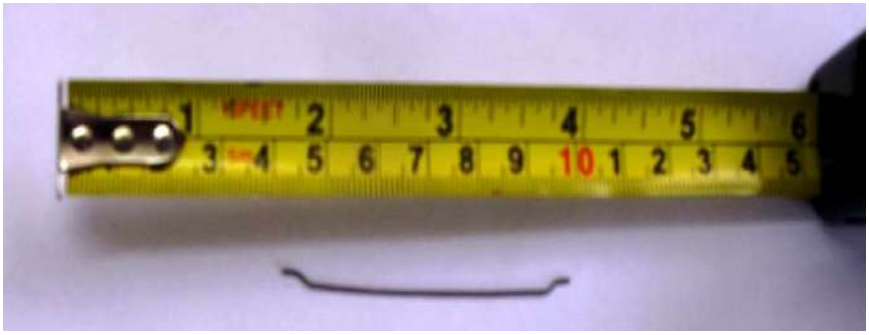


Figura 5: Exemplar da fibra de aço utilizada.

2.1.2 Cimento e Agregados

Utilizou-se na confecção dos corpos de prova cimento do tipo CP III – RS – 40 MPa. Esse cimento resulta da mistura de clínquer de cimento Portland comum com escória de alto-forno e apresenta resistência à sulfatos (teor de escória granulada de alto-forno entre 60 e 70%).

Esse cimento possui como vantagem um desprendimento mais lento de calor de hidratação o que resulta em menor fissuração. Contudo, apresenta como desvantagem um endurecimento mais lento e maior tempo de cura.

Para a confecção dos corpos de prova, utilizou-se como agregados graúdos rochas graníticas britadas. Assim, a dimensão máxima característica do agregado graúdo foi de 19 mm. O agregado miúdo utilizado foi a areia encontrada comunmente na cidade do Rio de Janeiro. Para evitar que o pó de pedra interferisse na trabalhabilidade do concreto, o agregado graúdo de menor dimensão máxima foi lavado e deixado ao tempo para diminuição da umidade resultante da lavagem durante 48 horas. A areia lavada foi peneirada previamente.

2.1.3 Plastificantes

Não foi utilizado qualquer tipo de plastificante. Essa escolha resultou em grande dificuldade na mistura, moldagem do concreto nas formas dos corpos de prova e adensamento. Os corpos de prova resultantes, portanto, apresentaram grande porosidade e alguns ninhos de concretagem.

Essa abordagem foi escolhida, no intuito de verificar se haveria alguma interferência significativa no sistema de reforço estrutural. Note-se que tal procedimento, qual seja, a não utilização de aditivos plastificantes, em concreto com fator água/cimento tão baixo não é recomendado, pois diminui, no caso específico do uso de fibras de aço incorporadas ao concreto, sua aderência, bem como aumenta-se o risco de surgimentos de ninho de concretagem. Esse último fator, produz uma diminuição na resistência da estrutura de concreto armado, bem como sua durabilidade. Portanto, esse procedimento foi adotado à título de experimentação.

2.1.4 Manta de Fibra de Carbono

Utilizou-se manta de fibras de carbono unidirecional, com as características descritas no Quadro 3:

Quadro 3: Características da manta de fibra de carbono

Gramatura (g/m²)	300,0
Espessura (mm)	0,116
Resistência máxima à tração (MPa)	4900,0
Módulo de Elasticidade (GPa)	230,0
Alongamento na ruptura (%)	2,1

2.1.5 Resina

Utilizou-se adesivo epóxi de baixa viscosidade com elevada aderência e sem retração, bi componente, à base de resina epóxi e poliamidas. As características da resina encontram-se descritas no Quadro 2:

Quadro 2: Características da resina

Densidade (kg/l)	1,1
Resistência à Tração (MPa)	25,0
Resistência à Flexão (MPa)	50,0
Módulo de Elasticidade (Gpa)	10,6
Pot Life (minutos)	20,0
Tempo de mistura mecânica (minutos)	1,0
Tempo de mistura manual (minutos)	3,0

2.2 Traço do Concreto

Para o cálculo do traço do concreto utilizou-se método prescrito pelo Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), desenvolvido por Petrucci e aperfeiçoado por Priskzulnik, Kirilos, Terzian, Tango e Helene, para um concreto com resistência à compressão aos vinte e oito dias (f_{c28}) de 40 MPa. O traço em massa utilizado encontra-se descrito na tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Traço do Concreto

Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Fator A/C
1,0 kg	1,1 kg	1,1 kg	1,1 kg	0,43 kg

A água utilizada na preparação do concreto foi aquela fornecida pela concessionária da cidade do Rio de Janeiro que, de acordo com dados da concessionária, com pH neutro.

3. ROTEIRO EXPERIMENTAL

Após a escolha dos materiais, passou-se à montagem do experimento. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados com diâmetro de 15,0cm e altura de 30,0 cm. Utilizaram-se moldes em PVC nos quais aplicou-se desmoldante à base de óleo mineral na diluição de 1:10 em água, mesma diluição recomendada pelo fabricante para formas de madeira plastificada.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Moldaram-se um total de dezenove corpos de prova cilíndricos com o concreto reforçado com fibras de aço. Não foram moldados corpos de prova sem a utilização de fibras de aço, já que a resistência à compressão do material de recuperação da viga será afetado pela incorporação das fibras de aço.

Os corpos de prova prismáticos foram moldados em formas de madeira compensada e plastificada, totalmente estanques nas dimensões de 10 x 10 x 30 cm. Foram utilizados dezoito moldes prismáticos. Nos moldes aplicou-se o mesmo desmoldante na diluição de 1:10 em água. Não houve dificuldade na desforma dos corpos de prova.

O volume total de concreto foi de 0,165m³, suficiente para a moldagem dos corpos de prova e considerando-se algum desperdício, na ordem de 10% do volume total de concreto. Utilizou-se um teor de fibras de aço de 92,7 kg/m³, considerado o volume total de concreto (incluindo o desperdício). Note-se que os teores recomendados pelos fabricantes de fibras de aço variam entre 20 e 40 kg/m³, portanto, o teor utilizado pode ser considerado alto para os padrões recomendados pelos fabricantes e utilizados corriqueiramente.

Para verificação da umidade do agregado miúdo, de tal forma que a quantidade de água a ser adicionado ao concreto fosse corrigida (considerando-se a umidade do agregado miúdo), utilizou-se aparelho demonstrado na Figura 6.

Os materiais foram então pesados e separados nas quantidades apresentadas na Tabela 2. É importante relembrar que o agregado graúdo de menor dimensão (10mm) utilizado foi anteriormente lavado para que os finos resultantes do processo de britagem não interferissem na trabalhabilidade do concreto, haja vista o aumento que poderia ocorrer na área de molhagem.



Figura 6: Speedy Test para verificação da umidade da areia

Tabela 2: Quantidades de materiais utilizados no concreto

Cimento CPIII-40-RS (kg)	Areia		Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água corrigida (kg)	Fibra de aço	
80,9	Umidade média (%)	Peso corrigido (kg)	88,9	88,9	33,2	Peso (kg)	Teor de Fibras (kg/m³)
	1,8	90,5				*15,3	92,7

*4% em massa

Foram adicionados à betoneira os agregados, cimento e fibras de aço. A quantidade total de fibras foi adicionada paulatinamente para facilitar a dispersão. Após, adicionou-se toda a água. A mistura, pelo baixo Fator Água/Cimento, resultou em baixa trabalhabilidade. Após a adição da água, betonou-se a mistura por 10 minutos.

Para medição da plasticidade, utilizou-se o ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*). Todo o material de ensaio foi previamente umedecido e a placa de base apoiada sobre piso previamente nivelado. O abatimento do concreto com fibras medido foi de apenas 2,0 cm.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

A título de verificação, preparou-se pequena quantidade de concreto sem fibras e com mesmo traço utilizado. Após realização de ensaio de abatimento de tronco de cone, verificou-se que o concreto sem fibras apresentou um abatimento de 2,5 cm, demonstrando melhor trabalhabilidade.

Dessa forma, como já descrito por diversos autores, o abatimento do tronco de cone não representa uma boa medida da trabalhabilidade do concreto adicionado de fibras. Arif [13] sugere o ensaio de VeBe, considerado mais apropriado para avaliar a trabalhabilidade do CRFA. O ensaio de VeBe é o tempo necessário para uma determinada massa de concreto se consolidar por vibração em um molde de fôrma cilíndrica sob uma massa adicional. Esse teste é sensível à mobilidade e fluidez de concreto reforçado com fibras e é particularmente útil para mistura que parece ser rígida e dura quando avaliada pelo tronco de cone.





Figuras 7 e 8: Ensaio de abatimento de tronco de cone

Para o adensamento dos corpos de prova utilizou-se compactação manual. Observe-se que esse adensamento teve de ser bastante vigoroso com 25 golpes do por camada de 5 cm.

Aguardou-se 4 horas para o endurecimento dos corpos de prova. Após essas quatro horas, os corpos de prova foram desformados e cobertos com mantas de tecido de algodão úmidas durante 12 horas. Esses tecidos foram umedecidos a cada 6 horas para manutenção da saturação do concreto em cura.

Após 16 horas da moldagem, os corpos de prova foram totalmente imersos em água durante 15 dias. Após esses primeiros 16 dias, os corpos de prova foram mantidos em temperatura entre 24 e 26° C em local fechado.

Após 62 dias, os corpos de prova prismáticos foram preparados para aplicação do polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC). Os ensaios de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos e tração na flexão dos corpos de prova prismáticos ocorreram trinta dias após essa aplicação, num total de 92 dias após a moldagem do concreto.

Essa preparação consistiu na preparação da superfície de trabalho, medição e corte da manta de fibra de carbono e marcação do terço médio dos corpos de prova, conforme registrado nas Figuras 9 e 10.

A manta de fibra de carbono utilizada foi cortada em tiras de 4 x 30 cm, 5 x 30 cm e 6 x 30 cm. Os dezoito corpos de prova prismáticos foram divididos da seguinte forma: 6 prismas sem reforço com PRFC (série T0), 3 prismas com reforço de PRFC nas dimensões de 4 x 30cm (série T04), 3 prismas com reforço de PRFC nas dimensões de 5 x 30cm (série T05), 3 prismas com reforço de PRFC nas dimensões de 6 x 30cm (T06) e 3 prismas com reforço de PRFC de 10 x 30cm (T10) compostos por duas tiras de 5 x 30 cm, haja vista a largura máxima de fibra disponível ser de 6 cm, conforme observado na Tabela 3.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Tabela 3: Séries dos corpos de prova prismáticos

Série	Dimensões dos polímeros reforçados com fibras de carbono (cm)
T0	Sem reforço
T04	4 x 30
T05	5 x 30
T06	6 x 30
T10	10 x 30

O procedimento utilizado para composição do reforço com PRFC de 10 x 30 cm de largura gerou uma emenda no eixo longitudinal dos prismas, ou seja, na direção paralela à maior dimensão do prisma, o que não influenciou os resultados obtidos, baseado nas recomendações do ACI 440.2R-08.

A superfície onde foi aplicada a manta de fibra de carbono foi desbastada até a exposição dos agregados graúdos 48 horas antes da aplicação e limpa para retirada de qualquer material pulverulento que pudesse diminuir a aderência da resina à matriz de concreto. Essa preparação é necessária e visa retirar a camada de pasta de cimento formada durante a moldagem dos corpos de prova, o que torna melhor a aderência do PRFC ao concreto, evitando o destacamento prematuro do reforço.

Todo o material utilizado foi protegido de materiais oleosos, úmidos ou pulverulentos. Essa medida visou impedir a contaminação do material de trabalho com qualquer outro material que pudesse diminuir a aderência entre os elementos do reforço.

A resina epóxi utilizada era bicomponente e, para sua homogenização, utilizou-se mistura manual durante três minutos, conforme especificado pelo fabricante. A metodologia de impregnação das fibras de carbono foi por via úmida, ou seja, a manta de fibra de carbono foi submersa na resina e aplicada sobre os corpos de prova prismáticos.





Figuras 9 e 10 : Materiais utilizados para preparação da manta de fibra de carbono (Figura 9) e manta de fibras de carbono após preparação (Figura 10)

As tiras de manta de fibra de carbono impregnadas com a resina foram aplicadas sobre os prismas. Para garantir a total aderência das fibras ao concreto, utilizou-se rolo plástico para expulsão de bolhas de ar e garantir a menor distância possível entre as fibras e o concreto, evitando-se também a formação de camada muito espessa de resina entre as fibras de carbono e o concreto. Dessa maneira, a resistência à tração das fibras de carbono foi mais bem aproveitada. Aguardou-se um período de 24 horas para aplicação de nova camada de resina epóxi. Os corpos de prova prismáticos já reforçados podem ser observados na Figura 11 e 12.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459




Figuras 11 e 12: Corpos de prova prismáticos reforçados com PRFC

Os corpos de prova, primáticos e cilíndricos, foram enviados ao laboratório de ensaios responsável pelos testes de carga e rompidos após 30 dias da aplicação de PRFC nos corpos de provas prismáticos. Dessa forma, toda a capacidade resistente do polímero foi solicitada.

4. RESULTADOS

4.1 Ensaios de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos

Os corpos de prova cilíndricos foram ensaiados à compressão axial e apresentaram os resultados apresentados na Tabela 4. Note-se que os resultados de quatro corpos de prova cilíndricos foram descartados, pois, após preparação para o ensaio (decapagem), seu diâmetro ficou abaixo da dimensão mínima prevista em norma.

A resistência média a compressão foi de 33,2 MPa, ou seja, abaixo do traço teórico inicial de 40,0 MPa. Dessa forma, a utilização de altos teores de fibras de aço pode afetar negativamente a resistência à compressão do concreto reforçado com fibras de aço, conforme já observado em alguns trabalhos.

Pelos critérios da NBR 12655:2015, o fck_{est} desse concreto é de 23,5 MPa. Dessa forma, pode-se estimar a resistência à tração desse concreto em 2,35 MPa, ou seja, 1/10 da resistência à compressão.

Tabela 4: Resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos

Corpo de Prova	Resistência (MPa)	Exemplar	Resistência Exemplar (MPa)	Observações
C8	22,8	f1		
CA7	23,5		23,5	
C2	29,3	f2		
C1	30,6		30,6	
C7	30,8	f3		
C4	31,7		31,7	
CA1	32,0	f4		
CA3	33,9		33,9	
C5	34,7	f5		
CA6	35,2		35,2	
Padrão	36,7	f6		
C6	38,4		38,4	
C9	38,7	f7		Desprezado conforme NBR 12655:2015
CA5	38,9		38,9	
CA9	40,1	Desprezado		
		Média (MPa) =	33,2	
		Desvio Padrão (MPa) =	5,28	Classe B, conforme NBR 12655:2015
		Psi 6=	0,89	Conforme tabela 8 NBR 12655:2015

4.2 Ensaios de tração na flexão dos corpos de prova prismáticos

Utilizando-se prensa universal, realizaram-se ensaios de tração na flexão com três pontos nos corpos de prova prismáticos reforçados com PRFC. O resultado dos ensaios encontra-se detalhado nas Tabela 5.

A partir desses ensaios, foi possível observar, como já esperado, um aumento da resistência à tração na flexão dos prismas reforçados com PRFC quanto maior fosse a largura de PRFC aplicado ao banzo tracionado quando comparada a largura da base do prisma. Ou seja, quanto mais larga a manta de fibra de carbono aplicada, maior a resistência à tração na flexão. Esses resultados podem ser observados na Figura 13.

Tabela 5: Resultados dos Ensaios de Tração à Flexão dos corpos de prova prismáticos

	T0	T04	T05	T06	T10
Corpo de prova	Fct (MPa)	Fct (MPa)	Fct (MPa)	Fct (MPa)	Fct (MPa)
1	10,08	14,47	15,35	24,55	24,33
2	15,35	13,24	25,43	25,56	17,76
3	10,00	21,92	14,03	22,58	13,24
4	10,52	-	-	-	-
5	10,61	-	-	-	-
6	10,87	-	-	-	-
Média=	11,24	16,54	18,27	24,23	18,44
Desvio-Padrão=	1,86	3,84	5,09	1,24	4,55

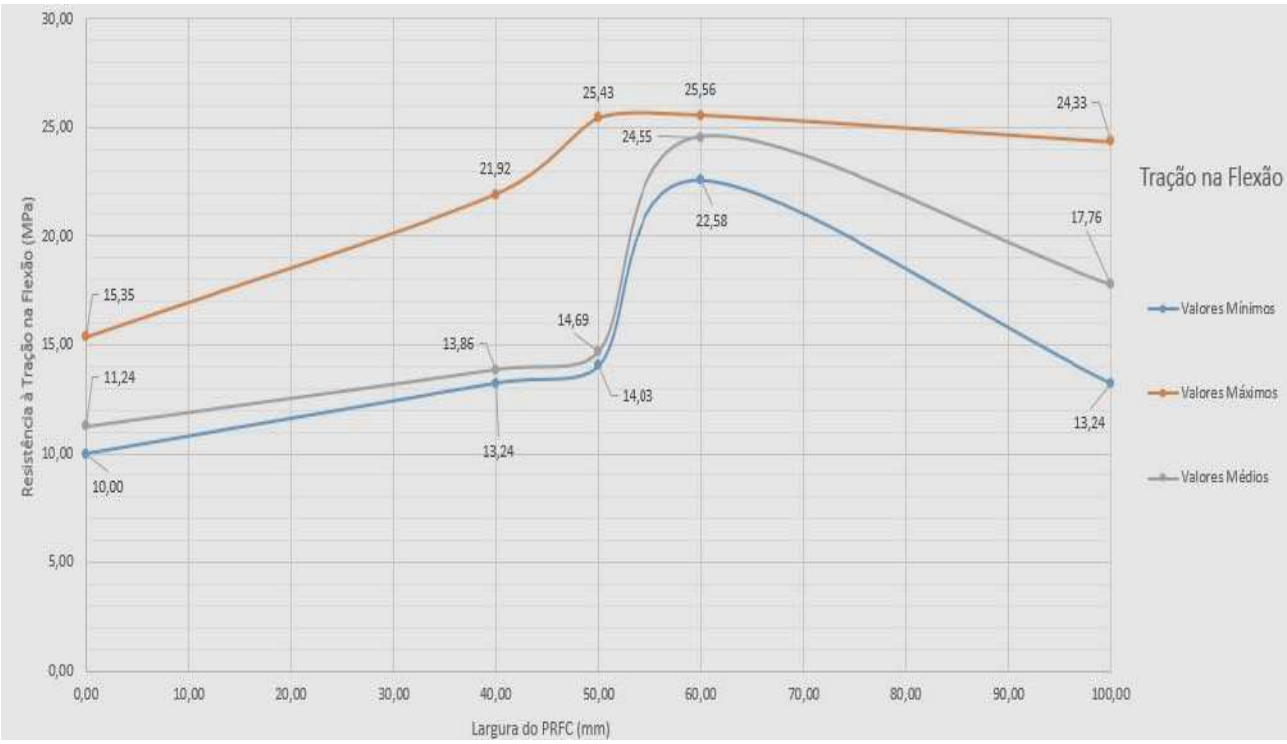


Figura 13: Curvas de aumento da resistência em função da largura de PRFC

5. COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DA SOLUÇÃO UTILIZADA E INCREMENTO NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Após a análise dos resultados, observou-se que o aumento das larguras da manta de fibra de carbono não promoveu um acréscimo linear da resistência à tração na flexão.

Assim, observando-se que o maior custo nos reforços com fibras de carbono encontra-se exatamente na quantidade de fibra utilizada, passou-se à observação da relação entre incremento de resistência e custo da solução proposta. Utilizando-se as resistências mínimas, analisou-se o acréscimo de resistência desenvolvido através da comparação dos resultados da série de prismas reforçados com fibras de aço sem nenhuma aplicação de fibra de carbono e cada série de prismas reforçados com diferentes larguras de PRFC.

Dessa forma, chamou-se de incremento de resistência a relação entre a resistência mínima de uma séria Tn e a série de referência T0, sem reforço de PRFC.

Após, passou-se a analisar o custo por metro quadrado de cada solução com o chamado incremento de resistência. Para cada solução, comparando-se unicamente a quantidade de manta de fibra de carbono utilizada (justifica-se pelo alto custo da fibra e também porque o acréscimo nas quantidades de outros materiais é proporcional à quantidade de fibra de carbono utilizada) obteve-se a quantidade de fibra a ser utilizada por metro e, consequentemente, a área por metro. Esse procedimento está demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6: Comparação resistências mínimas e custos da solução

Solução	Mínimos (MPa)	Área de Fibra de Carbono (m²/m)	Incremento de Resistência (Tn/T0)	Custo da Solução (R$/m²)
T0	10,00	0,000	1,0	0,00
T04	13,24	0,040	1,3	10,62
T05	14,03	0,050	1,4	13,27
T06	22,58	0,060	2,3	15,92
T10	13,24	0,100	1,3	26,54

Dessa forma, obteve-se a relação incremento custo demonstrada na Figura 15. Com esse gráfico observou-se que utilizando-se um reforço em 60% da largura do prisma, obteve-se a melhor relação custo/resistência.

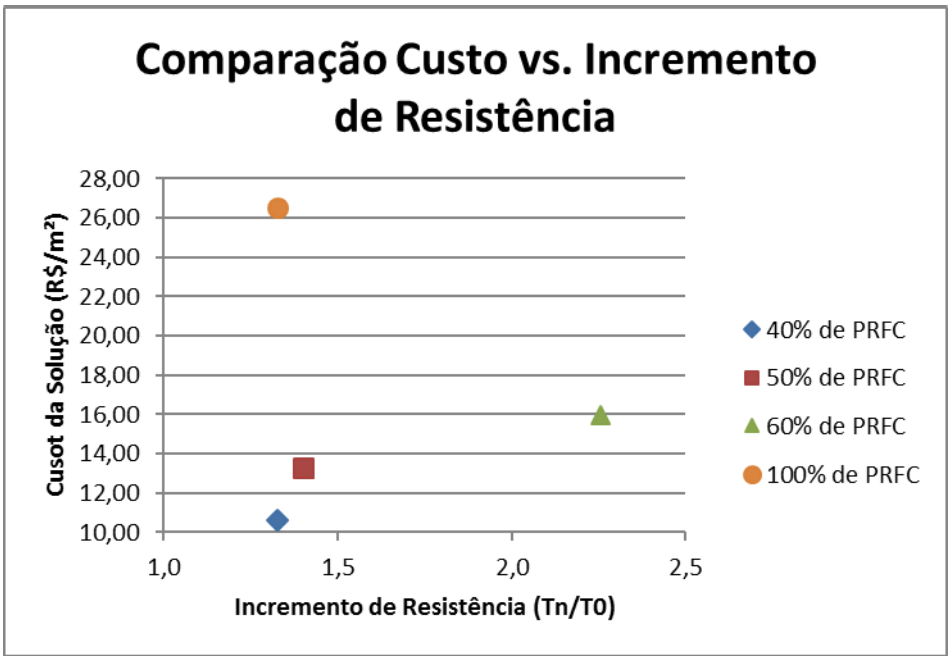


Figura 15: Custos em comparação ao incremento de resistência

6. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi possível observar a importância da utilização de fibras em conjunto com o concreto, suas vantagens e desvantagens. Notou-se também que há necessidade de maior incentivo à pesquisa e normatização do uso das diversas

fibras para que as mesmas possam ser agregadas à rotina das construções do país, dentro das características adequadas a cada uma delas.

A grande dependência dos PRFC quanto ao preparo adequado dos materiais, domínio das técnicas e treinamento da mão de obra demanda que a academia dissemine o conhecimento, especialmente, propondo normas para utilização e dimensionamento dos PRFC, fabricação de materiais e verificação da qualidade do material aplicado.

Especificamente quanto ao resultado dos ensaios, observou-se que a utilização de concreto reforçado com fibras de aço para recuperação e reforço de banzo tracionado de vigas é perfeitamente viável dado os custos da fibra de aço que são muito pequenos quando comparados ao incremento de resistência que podem proporcionar ao PRFC pela redução da fissuras (diminuindo o risco de destacamento prematuro do reforço), bem como o surgimento de comportamento dúctil no conjunto matriz de concreto + PRFC, que atua a favor da segurança.

Os resultados dos ensaios mostraram que, em termos de custos e incremento de resistência, a solução mais econômica é a utilização de PRFC em 60% da base dos prismas.Os resultados dos ensaios mostraram que, em termos de custos e incremento de resistência, a solução mais econômica é a utilização de PRFC em 60% da base dos prismas. Contudo, esse resultado precisa ser confirmado através de mais ensaios, especialmente moldando-se mais corpos de prova prismáticos e vigas em dimensões reais.

Além dos itens citados acima, realizar séries diversas de corpos de prova e vigas, utilizando-se percentuais diversos de plastificantes, para verificar a influência desses na resistência das fibras de aço, bem como utilizar sistemas de polímeros de fibras de carbono fornecidos por diferentes fabricantes.

6. REFERÊNCIAS

[1] Santos, A. F. C. dos, Junior, J. L. A., Nascimento, L. H. A. do, "Estado geral dos postes cilíndricos em concreto armado na cidade do Rio de Janeiro", MT 06, *IV CIRMARE*, Rio de Janeiro, 2015.

[2] Tutikian, B., Pacheco, M., "Inspeção, diagnóstico e prognóstico na construção civil – Boletim Técnico nº 1". *CONPAT 2013*, ALCONPAT, México, 2013, pág. 4.

[3] Branco, F *et al.* – "Vida Útil na Construção Civil – Boletim Técnico nº 4". *CONPAT 2013*, ALCONPAT, México, 2013, pág. 5.

[4] Li, V.C., 2002, apud Sousa, M. L. Q. P. de, "Comportamento à flexão de vigas de betão reforçado com fibras de aço", Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014, pág. 4.

[5] Sousa, M. L. Q. P. de, "Comportamento à flexão de vigas de betão reforçado com fibras de aço", Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014, pág. 4.

[6] Taylor apud Beber, A. J., "Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono", Tese, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, julho de 2003, págs. 20 a 40.

[7] Machado, M. G., "Estudo experimental da ductilidade de vigas em concreto armado reforçadas à flexão utilizando compósitos com tecido de fibras de carbono", Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, julho de 2004., págs. 18 a 65.

[8] Ferrari, V. J., "Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero com fibras de carbono (prfc) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho", Tese, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2007, págs. 24 a 153.

[9] Sánchez Filho, E. S., Santos, A. F. C. dos, Santos, M. F. S. F. dos, "Patologias e reforço em lajes e vigas de concreto armado com compósitos de fibra de carbono", MT 07, *IV CIRMARE*, Rio de Janeiro, 2015.

[10] Pereira Junior, W. M., "Análise numérica de estruturas de concreto com fibras utilizando mecânica do dano", Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014, págs. 21 a 103.

[11] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), "NBR 15530:2007 – Fibras de aço para concreto – Especificação", Rio de Janeiro, 2007.

[12] Figueiredo, A. D. de, "Concreto com fibras de aço", *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, USP, São Paulo, 2000, págs. 2 a 20.

[13] Arif, M. A., "Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço". Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014, págs. 50 a 135.