

## ANÁLISE SOBRE O USO DE FIBRA DE CARBONO E ARAMIDA EM REFORÇO ESTRUTURAL

### ANALYSIS ON THE USE OF CARBON FIBER AND ARAMID IN STRUCTURAL REINFORCEMENT

André Martello<sup>1</sup>

Natália Cristina Thien Bleichvel<sup>2</sup>

Recebido em: 12 mar. 2020

Aceito em: 18 maio 2020

#### RESUMO

O concreto armado é o segundo material mais consumido no mundo, este vem exercendo um papel fundamental no desenvolvimento da humanidade desde a sua invenção. Um material resistente, mas suscetível a patologias quando não dada a devida atenção para sua estrutura. O reforço estrutural é um caminho a se seguir quando se fala em recuperação de estruturas de concreto. O trabalho aborda o método de reforço estrutural de corpos de prova com fibra de aramida e fibra de carbono. Uma delas, descoberta a quase 60 anos é matéria prima para coletes balísticos, esta é a aramida. A outra, usada a quase 40 anos em automobilismo de alto nível e outros campos de engenharia, a fibra de carbono. A maneira a fazer este reforço é confinando um corpo de prova com os materiais compósitos e prender estes a uma bolsa de vácuo para aprimorar a cura do material polimérico e garantir que as fibras fiquem extremamente presas a peça. Este método se chama laminação a vácuo e é caracterizada pela qualidade dos resultados finais com mais uniformidade nas peças. Os resultados foram através do ensaio de compressão de corpo de provas, realizados nos intervalos de 7, 28 e 32 dias para os corpos de prova reforçados. Os corpos de fibra de carbono tiveram o melhor rendimento de todo o experimento, ficando com a média de valores superiores aos outros corpos de prova em relação a resistência a compressão. Tornando-se este o melhor para reforços estruturais no quesito materiais compósitos.

**Palavras-chave:** Concreto armado, reforço estrutural, fibra de carbono, fibra de aramida, resistência a compressão.

#### ABSTRACT

Reinforced concrete is the second most consumed material in the world, it has been playing a fundamental role in the development of humanity since its invention. A resistant material, but susceptible to pathologies when not paying due attention to its structure. Structural reinforcement is a way forward when it comes to recovering concrete structures. The work addresses the method of structural reinforcement of specimens with aramid fiber and carbon fiber. One of them, discovered almost 60 years ago is raw material for ballistic vests, this is

---

<sup>1</sup> Acadêmico de Engenharia Civil. Universidade do Alto Vale do Rio do Peixe (UNIARP). E-mail: [andre\\_martello@hotmail.com](mailto:andre_martello@hotmail.com)

<sup>2</sup> Professora, Especialista do curso de Engenharia Civil da Universidade Alto Vale do Rio do Peixe (UNIARP). E-mail: [nataliableichvel@gmail.com](mailto:nataliableichvel@gmail.com)

aramid. The other, used for nearly 40 years in high-end motoring and other engineering fields, carbon fiber. The way to do this reinforcement is to confine a specimen with the composite materials and attach them to a vacuum bag to improve the curing of the polymeric material and ensure that the fibers are extremely trapped in the piece. This method is called vacuum lamination and is characterized by the quality of the final results with more uniformity in the parts. The results were through the test of compression of specimens, performed in the intervals of 7, 28 and 32 days for the reinforced specimens. The carbon fiber bodies had the best performance of the entire experiment, with the average of values superior to the other specimens in relation to the compressive strength. This makes it the best for structural reinforcements in terms of composite materials.

**Keywords:** Reinforced concrete, structural reinforcement, carbon fiber, aramid fiber, resistance to compression.

## INTRODUÇÃO

O concreto, apesar de ter elevada resistência, com o passar dos anos, pode acabar apresentando algumas manifestações patológicas. Diversas são as necessidades que competem ao engenheiro civil projetar um reforço de estruturas de concreto armado. Nas principais das ocasiões estas estruturas não tiveram o devido controle de agregados em sua execução. Podem ter o seu uso alterado para um novo tipo. Pode ter sofrido algum tipo de esforço além do especificado em projeto. Sofrer com abalos sísmicos (onde ocorrentes), incêndios e explosões, entre muitas outras necessidades.

Estes procedimentos de reforço, além de adicionar novos complementos a estrutura ainda deve ser feito para preparar as danificadas a ponto de receber um novo elemento e então poder estar reabilitada para seu uso cotidiano.

Pensando nestes problemas é que a engenharia tem uma solução muito prática e eficaz, que é o uso de fibras em suas estruturas já danificadas ou que sofrerão alguma mudança de esforço. As fibras de carbono e aramida são materiais compósitos usados a muitos anos em outros segmentos da indústria e não seria na construção que deixaríamos de usar materiais com características tão relevantes para a nossa área, como por exemplo: leveza e resistência mecânica.

Tendo este trabalho como objetivo geral analisar dentre os materiais citados a capacidade de carga deles em uma situação de reforço estrutural, respondendo a questão problema que é: Quais as principais diferenças de resistência entre os materiais compósitos adotados para reforço estrutural?

Buscando a resposta para a questão através dos seguintes objetivos específicos: Apresentar referencial teórico sobre reforço de concreto armado com os materiais compostos de fibra de carbono e fibra de aramida. Realizar ensaios de corpo de prova para verificação de resistência obtida. Comparativo de resultados de resistência fck (*Feature Compression Know*) encontrados. Determinação de custos de material em um reforço de pilar com base nos custos do reforço de corpo de prova.

Justificados pelo pensamento de que, estruturas de concreto armado, apesar de durabilidade e considerável vida útil, estas precisam de manutenção e também nem sempre poderão desempenhar a mesma função. Podendo apresentar em elementos estruturais fissuras indesejadas e problemas decorrentes de má execução de projeto.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### CONCRETO ARMADO

A pedra natural e a madeira foram os primeiros materiais usados na construção desde a antiguidade, conforme a civilização foi evoluindo surgiram os metais e posteriormente o aço, o ferro e o concreto como conhecemos hoje surgindo no século XIX. Resistência e durabilidade sempre foram quesitos para que os materiais de construção fossem considerados bons. A pedra e sua característica resistência elevada a compressão, o aço com sua elevada resistência a tração e a compressão, porém precisando de cuidados para a corrosão (BASTOS, 2006).

Foram as novas construções e as necessidades do homem que fez com surgisse o concreto armado, aliando as características de seus agregados como a pedra (compressão e durabilidade) com a do aço (resistências mecânicas) junto com a facilidade de assumir qualquer forma com rapidez, além de proporcionar a requerida proteção a corrosão que o aço precisa (BASTOS, 2006).

O concreto é um material que apresenta uma alta resistência a tensão de compressão, porém apresentando uma baixa resistência a tração (aproximadamente 10% de sua resistência de compressão), esta baixa resistência levou que fosse de suma importância a adição de algum material que fosse capaz de resistir a este esforço, adotando assim o aço, onde, concreto simples + armadura de aço passa a se chamar de “concreto armado” (BASTOS, 2006).

## REFORÇO ESTRUTURAL EM CONCRETO ARMADO

A evolução da construção que se teve nos dias de hoje só nos alimenta a certeza que o concreto pode se tornar um material instável na construção, isto se deve da alteração dos seus aspectos físico e químicos ainda como os componentes e suas respostas às intempéries do meio ambiente. Em consequência destes processos de transformação que venham a alterar o desempenho de uma estrutura costuma-se chamar deterioração. Os elementos causadores disto são chamados “Agentes de Deterioração” (SOUZA; RIPPER, 1998).

Cada material na obra reage de uma maneira a cada agente, sendo pela forma que se deteriora, velocidade do acontecimento pela natureza do material ou componente e das diferentes condições de exposição aos agentes de deterioração. Uma análise do fenômeno no componente admite-se satisfatória quando a sua curva de deterioração em vida útil torna-se positiva ao custo inicial e seu custo de reposição ou recuperação (SOUZA; RIPPER, 1998).

“O ponto em que cada estrutura, em função da deterioração, atinge níveis de desempenhos insatisfatórios varia de acordo com o tipo de estrutura” (SOUZA; RIPPER, 1998 p. 18).

Na indústria da construção civil diferentes técnicas são usadas no reforço estrutural. Antes de sua execução é imprescindível que seja analisada as possíveis soluções para ser adotadas em cada situação de deterioração, de forma a respeitar as características técnicas do ambiente onde está inserido o elemento (SARAIVA, 2016).

O reforço de confinamento de pilares age de forma a conter a compressão de que o pilar em seu exercício sofre. Estando em compressão o pilar tem uma tendência a expandir lateralmente conforme vai exercendo sobre si uma carga de compressão, este confinamento tem por objetivo conter a força axial atuante no pilar fazendo com que este venha a suportar uma maior carga de compressão (FILGUEIRA; LEITE; ARAÚJO, 2017).

## FIBRA DE CARBONO

Atualmente entre os diversos materiais estudados, um dos que mais mereceram a atenção especial de grupos de pesquisa devida às suas características é a fibra de carbono, destacando-se pela baixa densidade em conjunto com uma alta resistência mecânica. As indústrias aeronáutica e aeroespacial foram as primeiras a utilizar este material poderoso, o

sucesso de suas aplicações fez crescer as pesquisas e com isso novas aplicações para o material, bem como aprimoramentos na sua fabricação (MACHADO, 2010).

O processo de produção da fibra de carbono é feito através na oxidação dessas fibras, seguido pelo processo de serem elevadas a temperaturas que variam de 1000°C a 1500°C para as fibras de carbono e podem chegar a 3000°C para as fibras de grafite (MACHADO, 2010).

Conforme conta Machado (2010), deste processo, o módulo de elasticidade do material resultante depende da temperatura em que é feito o processo, podendo chegar de 100GPa a 300GPa nas fibras de carbono e podendo ainda chegar a 650GPa nas fibras de grafite, estas a quais podem acabar custando de 15 a 20 vezes a mais que as fibras de carbono, visto que o custo destes materiais dependem de seu módulo de elasticidade.

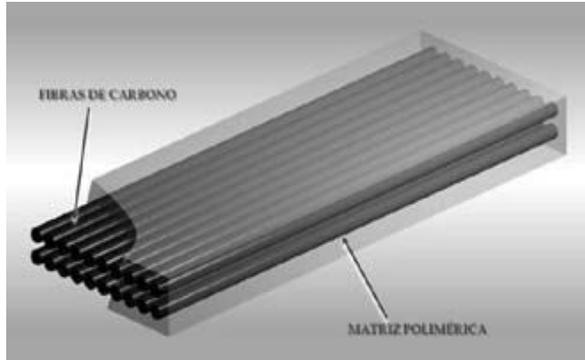
Segundo Machado (2010), os Compostos estruturados com Fibra de Carbono, CFC, são basicamente com dois elementos distintos e fundamentais para o seu sucesso.

- A matriz polimérica, a quem cabe a função de manter as fibras que as estruturam coesas, propiciando a transferência das tensões de cisalhamento entre os dois elementos estruturais, concreto e fibra de carbono.
- O elemento estrutural, constituído pelas fibras de carbono. As fibras dispostas unidirecionalmente dentro das matrizes poliméricas absorvem as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes atuantes (MACHADO, 2010, p. 04).

Conforme conta o mesmo autor, na Figura 1 a seguir, os bastões pretos aqui são fibras de carbono, estando imersas na matriz polimérica. As fibras são o principal responsável pela resistência mecânica do sistema, já a transposição das tensões solicitantes do substrato de concreto para a fibra em si, está a cargo da matriz polimérica. A mesma matriz ainda deve ter a resistência de ruptura maior que a da fibra, pois esta deverá manter capacidade de carga mesmo após a fibra chegar a sua tensão de ruptura (MACHADO, 2010).

Representando a citação acima, a Figura 1 mostra a fibra de carbono e sua matriz polimérica (resina epóxi).

Figura 1: Representação esquemática de um sistema de fibras de carbono



Fonte: Machado (2010).

Em termos simples de comparação, Souza e Ripper (1998, p. 154) afirmam que “Os compósitos de fibra de carbono em matrizes de resina epoxídica apresentam, em comparação com o aço de construção, para uma mesma espessura, um quarto de peso e uma resistência a tração de oito a dez vezes maior[...]”.

#### FIBRA DE ARAMIDA

A fibra de aramida, desde a sua sintetização é reconhecida como um material de incrível resistência a altas temperaturas, uma grande resistência a tração e ao corte com um elevado módulo de elasticidade. Foram estas as características que fizeram com que este elemento fosse tão usado em situações de intensa solitação como, em coletes a prova de balas, roupas de bombeiros e revestimentos de aeronaves (BERNARDI, 2003).

A invenção do nylon e das fibras têxteis subsequentes proporcionou uma poderosa visão e orientação para o esforço de pesquisa destinado a 'super' fibras. No início dos anos 1960, a empresa Du Pont foi impulsionada por dois objetivos, uma fibra com a resistência ao calor do amianto e a rigidez do vidro (TANNER; FITZGERALD; PHILIPS, 1989, p. 649).

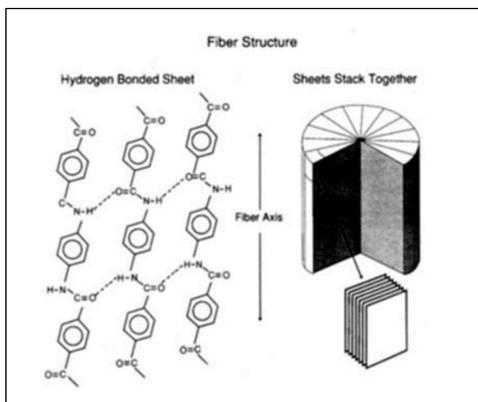
Conhecido como o material com o qual são produzidos coletes à prova de balas. Podendo ter muitas outras aplicações como pneus, velas de barcos, cordas, e pastilhas de freio. Apesar de ser uma fibra, a sua razão de força/peso é altíssima, se tratando em resistência, o material de aramida é considerado 5 vezes mais forte se comparado ao mesmo peso do material de aço. A empresa química DuPont produziu uma meta aramida denominada “Nomex”

pela primeira vez no início dos anos 1960, e a marca Kevlar® foi sintetizada em 1972 como uma para-aramida (DuPont, 2015 apud SÁ, 2015).

A razão para as suas propriedades mecânicas extraordinárias é provavelmente atrelada a microestrutura da fibra, Kevlar é um material altamente cristalino ligado a hidrogênio. Folhas de suas células se estendem pelos raios da fibra e resultam em uma quase perfeita ordem radial e longitudinal, a sua resistência está em um nível nunca visto em uma fibra sintética antes de sua criação (TANNER; FITZGERALD; PHILIPS, 1989).

A Figura 2 ilustra a forma que a fibra tem em sua composição molecular e seus componentes da microestrutura.

Figura 2: Estrutura da fibra simplificada e conjunta.



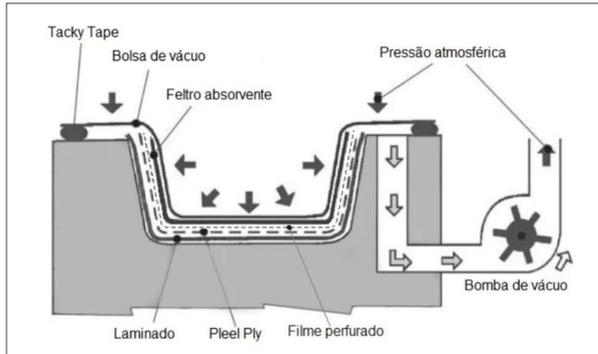
Fonte: Tanner; Fitzgerald; Philips (1989).

## LAMINAÇÃO A VÁCUO

A laminação a vácuo, chamada também de Vacuum Bag, é o processo de laminação onde é exercida pressão atmosférica negativa sobre a peça em seu molde, fazendo com que o excesso de resina seja expelido para fora da peça, fazendo com que a impregnação de resina nos materiais compósitos seja de maior qualidade, ficando sem espaços vazios e sem peso extra, conferindo a peça uma maior resistência mecânica no geral (SIEBEL, 2018).

Confere ainda a Siebel (2018) os créditos pela ilustração a seguir (Figura 3), onde descreve a ordem para a alocação dos materiais descartáveis, acima do compósito para a correta utilização do procedimento de laminação a vácuo.

Figura 3: Disposição das camadas do material descartável na laminação a vácuo



Fonte: Siebel (2018).

## MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho se trata de um estudo de caso prático, ou seja, partindo de um início já conhecido não precisando passar pela tentativa e erro, o reforço de concreto armado para materiais compósitos é conhecido e muito utilizado, o trabalho confere a este assunto um teste de resistência para os materiais simulando uma situação real de um pilar sendo comprimido. Todo o procedimento para a elaboração do trabalho e dos testes de corpos de prova tem como base os estudos bibliográficos apresentados na fundamentação teórica do trabalho.

Foram confeccionados 8 (oito) corpos de prova (CPs). nas dependências da universidade. Respeitando-se o tempo de cura de 7 (sete) dias, dois destes são rompidos para a aferição da qualidade da massa e suas características iniciais para denominações de coesão e resistência inicial.

Ao final de 28 (vinte e oito) dias, são rompidos outros dois CPs com o intuito de tirar a prova real de qual a resistência obtida no ensaio e consequentemente a resistência dos CPs a serem ainda rompidos, esta resistência foi então adotada como a padrão do experimento sem qualquer reforço estrutural e será comparada com a obtida nos outros 4 (quatro) CPs depois de rompidos com os devidos reforços.

## MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

Antes mesmo da moldagem dos CPs, a massa de concreto foi submetida a um ensaio de tronco de cone para a aferição de sua plasticidade e se atende aos padrões necessários para o

uso em elementos estruturais. Seu resultado neste foi de 80mm de abatimento, considerado suficiente para a execução de pilares submetidos a vibração mecânica. Que é o elemento estrutural alvo desta pesquisa por ser o mais comum nas construções.

As formas de CP foram moldadas conforme rege a norma NBR 5738 (ABNT, 2015) que determina os procedimentos para a moldagem e cura dos corpos de prova, estes para que atendam aos critérios de qualidade e garantam a confiabilidade dos resultados obtidos após o rompimento das amostras. A Figura 4 apresenta os corpos de prova depois de moldados.

Figura 4: Corpos de prova moldados



Fonte: Autor (2020).

#### PROCEDIMENTO DE CONFINAMENTO DOS CORPOS DE PROVA

Como especificado acima, este trabalho usa a Fibra de Carbono e a Fibra de Aramida como materiais de reforço estrutural. A Figura 5 mostra a fibra de carbono.

Figura 5: Fibra de carbono em tecido Bidirecional



Fonte: Autor (2020).

O tecido utilizado de fibra de carbono é de uma trama bidirecional, com uma gramatura de 200g/m<sup>2</sup> e uma espessura de 0,4 mm, sua aplicação foi feita em torno do CP para que desse 2 voltas em volta dele, com um comprimento de 65cm e uma largura de 30cm, foi laminada a primeira camada de resina epóxi em volta do CP e foi aplicada a manta em cima da resina fazendo movimentos no sentido perpendicular ao eixo para que toda a sua extensão estivesse em contato com a peça. Quando a camada inferior encontrou seu início foi passada a resina acima da última camada e assim feito até terminar todo o comprimento da manta enrolando o CP.

A Figura 6 a seguir mostra o processo de laminação e um dos CPs com fibra de carbono.

Figura 6: Processo de laminação e corpo de prova laminado



Fonte: Autor (2020)

Assim como na fibra de carbono, a fibra de aramida contém uma gramatura de 200gr/m<sup>2</sup> e uma espessura de 0,4mm, também passou pelo mesmo processo de laminação para a colocação da matriz polimérica no CP e a manta sendo grudada gradualmente. Com as mesmas dimensões do outro compósito este também completou duas voltas em volta do CP e com um transpasse de 5 cm na última camada, prevenindo uma eventual ruptura nesta seção.

Ao final do processo de laminação do corpo de prova com os materiais compósitos, o diâmetro final destes aumentaram em média 1,6mm, uma medida antes considerada impensável para qualquer tipo de reforço relacionado a construção civil, se tratando de concreto armado ou chapas metálicas.

A Figura 7 demonstra a fibra de aramida e o corpo de prova depois de sua laminação.

Figura 7: Fibra de aramida e corpo de prova laminado.



Fonte: Autor (2020)

### LAMINAÇÃO A VÁCUO

A laminação a vácuo tem como principal diferencial a homogeneidade de compactação e a retirada do excesso de matriz polimérica da peça, isso faz com que o material compósito absorva apenas o necessário para a sua cura e fique com aspecto uniforme, considerando que com o vácuo, todo o CP é pressionado com a mesma força, todas as suas áreas serão submetidas a mesma pressão para que fique com uma aplicação perfeita.

Tendo como amostra, dois CPs de fibra de carbono e os outros dois restantes de fibra de aramida, estes foram laminados e feitos a cura no processo de vácuo, onde o ar foi retirado da bolsa de vácuo fazendo com que a resina e o material compósito se unam com maior pressão na peça.

Para o procedimento de laminação a vácuo, são necessários uma série de materiais descartáveis, que devem ser empregados de forma correta para a qualidade dos resultados obtidos. Os materiais assim como a descrição de cada um deles são apresentados na Figura 8 a seguir.

Figura 8: Materiais utilizados para a laminação a vácuo

| Material                     | Função  |
|------------------------------|---|
| Peel ply                     | Tem a função de desmoldar todos os materiais que são necessários para o processo de Laminação a vácuo/Infusão a vácuo. Também tem a função de deixar a superfície preparada para uma futura laminação; é um tecido fabricado a partir de poliamida ou poliéster, geralmente com linhas paralelas coloridas para contrastar com o laminado |
| Filme perfurado              | Tem a função de fazer o sangramento do excesso de resina pelos furos no processo de laminação a vácuo, esses furos são entre 0,1mm a 1mm, dispostos a 6mm ou 12mm em orientação horizontal e vertical.  |
| Tecido absorvente (breather) | Tem a função de reter por meio das fibras de poliéster a resina em excesso proveniente do "sangramento" ocasionado pelo filme perfurado no processo de laminação  |
| Fita adesiva (tacky tape)    | Tem a função de selar as extremidades do molde em contato com o filme de vácuo nos processos de laminação a vácuo e infusão a vácuo   |
| Filme de vácuo               | É um filme que tem a função de recobrir todo o molde. Após aplicado a pressão negativa dentro do sistema, o filme comprime as partes do laminado, assim gerando uma superfície constante para a peça nos processos de laminação a vácuo e infusão a vácuo   |

Fonte: Siebel (2018).

Além destes, não são mencionados o uso de silicone e fita dupla face para o selamento da bolsa de vácuo, uma torneira com uma rosca para possibilitar instalar a mangueira da bomba de vácuo e fechar o sistema após ter a compressão necessária. A Figura 9 a seguir demonstra a ordem na laminação a vácuo dos materiais.

Figura 9: Ordem de laminação a vácuo para fibra de carbono e aramida



Fonte: Autor (2020)

Após a laminação dos materiais compósitos, os corpos de prova são envoltos então por uma camada de cada material acima citado e são então colocados dentro da bolsa de vácuo, esta por sua vez, feita com o filme de vácuo, sendo este o ultimo item. A Figura 10 inserida a

seguir demonstra a bolsa de vácuo e os corpos de prova já prontos para serem rompidos depois de retirados da mesma.

Figura 10: Bolsa de vácuo com CP e corpos de prova prontos para rompimento



Fonte: Autor (2020)

#### CALCULO DE CUSTO PARA EXECUÇÃO DO REFORÇO

O material usado neste trabalho foi comprado na internet e deve-se considerar que para a execução destes procedimentos em uma estrutura real, uma equipe devidamente especializada deve ser contratada. Em questão das fibras, existem vários tipos de fibra de carbono e de aramida, como por exemplo: unidirecional e bidirecional no caso da fibra de carbono. A estimativa de custo retratada é baseada nos materiais compósitos comprados para fins de estudo.

O Quadro 1 representa o valor por m<sup>2</sup> e por Kg de cada material utilizado.

Quadro 1: Custo de materiais por m<sup>2</sup> ou kg de material utilizado

| Custo por m <sup>2</sup> ou Kg de material utilizado |            |            |
|--|------------|------------|
|  | Quantidade | Valor      |
| Fibra de Carbono m <sup>2</sup>                      | 1,0        | R\$ 332,72 |
| Fibra de Aramida m <sup>2</sup>                      | 1,0        | R\$ 111,46 |
| Resina Epoxi Kg                                      | 1,0        | R\$ 76,90  |
| Tecido <i>peel ply</i> m <sup>2</sup>                | 1,0        | R\$ 19,50  |
| Filme perfurado m <sup>2</sup>                       | 1,0        | R\$ 24,57  |
| Manta <i>breather</i> m <sup>2</sup>                 | 1,0        | R\$ 8,91   |
| Filme de vácuo m <sup>2</sup>                        | 1,0        | R\$ 24,40  |

Fonte: Autor (2020).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Dado o problema, deve-se analisar qual material da engenharia avançada pode ser utilizado para reforço estrutural no cotidiano de obra e saber qual é o mais recomendado para cada situação.

Com a idade de 7 dias, o pesquisador obteve no CP nº 1 o valor de 12,87 MPa e no CP nº 2 o valor de 13,47 MPa, devida a esta diferença, foi adotado o valor médio de 13,17 MPa como padrão para os rompimentos com 7 dias de idade do concreto. A discrepância entre os dois corpos de mesma idade ficou em 0,6 MPa, comprovando a qualidade dos resultados.

Com a idade de 28 dias, o pesquisador obteve no CP nº 3 o valor de 19,09 MPa e no CP nº 4 o valor de 18,37 MPa, devida a esta diferença, foi adotado o valor médio de 18,73 MPa como o padrão para os rompimentos de 28 dias de idade do concreto. A discrepância que ocorre desta vez nos CPs de 28 dias de idade é de 0,72 MPa, comprovando também a qualidade nos resultados obtidos no experimento.

Este valor passou também a ser o padrão a ser considerado para a quantidade de ganho obtido com os reforços nos CPs, este, devido ao fato de que é o valor que será considerado como a resistência do elemento estrutural que se pretende realizar reforço. Após completados os 28 dias, são retirados todos os corpos de prova do tanque com água e os 4 íntegros restantes são então laminados com os materiais compósitos. Para cumprir o tempo de cura da resina epóxi, estes foram então desmoldados e preparados para ser rompidos com 32 dias de idade.

A uso da prensa para o experimento assim como suas dependências, foram gentilmente cedidos pela empresa parceira Gatti Mix, a prensa utilizada apresenta durante o processo o gráfico de carga x tempo até o rompimento do CP e descreve em tempo real qual a resistência MPa obtida no experimento. Facilitando a observação dos resultados do experimento e não havendo a necessidade de dividir a força de Kgf pela área superficial do corpo de prova. A Figura 11 inserida a seguir demonstra o CP nº 6, reforçado com fibra de carbono.

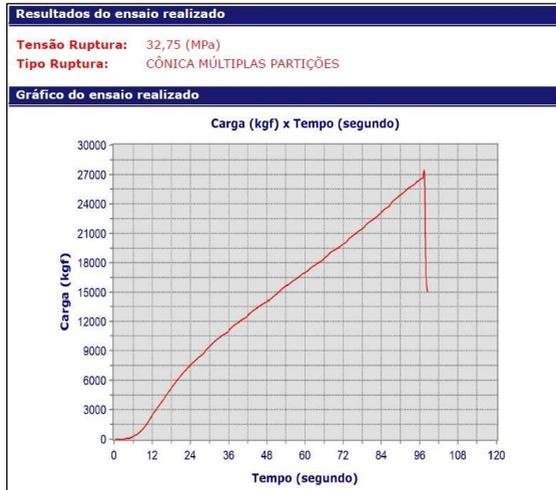
Figura 11: Corpo de prova de fibra de carbono



Fonte: Autor (2020)

O corpo de prova de nº 6 foi o que apresentou o melhor resultado deste tipo de reforço. O rompimento deste CP se deu de maneira que a abertura na fibra de carbono percorre quase toda a extensão do componente, iniciando quase imperceptível a fratura abre na vertical por 4 centímetros, onde algum ponto de maior resistência a obriga a ir para a direita e logo se rasga levemente na diagonal em uma grande abertura por cerca de 8 centímetros. Nesta grande abertura pode-se notar o concreto quebrado no seu interior, no final desta, a fibra encontra novamente um ponto de maior resistência na formação e se quebra para a direção esquerda e novamente a baixo, porém agora, demonstra uma leve ruptura nas fibras e as mantem juntas mas, de forma ainda perceptível a quebradura. Conforme mencionado acima, a prensa hidráulica apresenta um gráfico. A Figura 12 inserida a seguir demonstra este gráfico de rompimento.

Figura 12: Curva característica do ensaio de compressão axial CP 6 com fibra de carbono



Fonte: Autor (2020).

Este apresentou o resultado de 32,75 MPa obtido, sendo este o melhor e depois ficando o CP de nº 5 com 32,44 MPa de resistência. Este resultado é 13,66 MPa melhor que CP rompido sem a adição de reforços aos 28 dias de cura com o melhor resultado. O valor padrão a ser adotado para os corpos de prova com reforços de fibra de carbono neste experimento é a média entre os dois, ficando então em 32,59 MPa, este valor representa um aumento de 74,02% em relação a média dos ensaios de compressão obtidos dos CPs sem os reforços com 28 dias de cura. O seu tipo de ruptura cônica de múltiplas partições também foi caracterizado pelo tipo de rompimento da fibra e não do concreto em si. Quanto ao momento do seu rompimento, durante o carregamento diferentemente dos anteriores teve uma curva característica mais aguda, durante o carregamento este apresentou alguns estalos, leves na casa de 24 MPa ficando mais intensos em 29 MPa os quais cessaram em 31 MPa, momentos antes de se romper de uma forma muito brusca com um grande estouro indicando o limite de resistência das fibras. A Figura 13 a seguir mostra o melhor CP de fibra de aramida.

Figura 13: CP 8 com fibra de aramida



Fonte: Autor (2020).

Assim como os outros CPs reforçados, este último apresentou uma melhora significativa em relação aos corpos de 28 dias de cura. Nestes CPs de fibra de aramida a sua principal característica de utilização estiveram presentes, a resistência a tração e sua forma têxtil se sobressaem em detrimento da sua rigidez, ocorrendo o contrário do que acontece na fibra de carbono. A ruptura neste se deu de forma muito diferente dos outros, não apresentando nenhuma abertura ou fissura nas fibras, o que ocorre é a formação de uma espécie de inchaço no CP. A Figura 14 apresenta a curva característica deste CP no ensaio de compressão.

Figura 14: Curva característica do ensaio de compressão axial CP 8 com fibra de aramida



Fonte: Autor (2020).

O gráfico expressa uma curva característica muito incomum para não dizer rara, onde, o mesmo corpo de prova mostra em sua compressão duas formas de comportamento e uma curva anormal decrescente ligando as duas. A primeira parte do processo de rompimento no ensaio é expressa por uma linha contínua e firme, ela representa materiais duros, resistentes e pouco dúcteis, porém em cerca de 20 ou 21 MPa de resistência a compressão, este sofre uma perda de capacidade fazendo com que a sua curva de rompimento se assemelhe aos CPs sem qualquer reforço.

Seguido deste acontecimento, a curva característica deste corpo de prova volta a subir, mas agora apresentando características de um material mais plástico que o anterior e ainda muito resistente. Agora iniciando em aproximadamente 19 MPa depois da queda inesperada, ele torna a subir de forma a apresentar sons de rasgos ao invés de estalos como na fibra de carbono, os sons foram obtidos em 23 MPa, posteriormente se intensificando até atingir 25 MPa e cessa antes de romper em 28 MPa. O valor do outro corpo de prova de fibra de aramida foi de 26,73 MPa, fazendo com que a média do reforço de fibra de aramida fique em 27,37 MPa. Em comparação com o valor médio padrão para 28 dias de cura, a média do reforço de aramida é de 8,64 MPa maior, equivalente a um aumento de 46,12% na resistência ao ensaio de compressão de corpo de prova. O Quadro 2 a seguir apresenta os resultados obtidos em cada CP do experimento.

Quadro 2: Resultados dos ensaios de compressão de corpo de prova

| Ensaio de Compressão de Corpos de Prova |              |                       |           |                  |
|---|--------------|-----------------------|-----------|------------------|
| Amostra                                 | Idade (dias) | Resistência FCK (MPa) | Média MPa | Discrepancia MPa |
| CP 1                                    | 7            | 12,87                 | 13,17     | 0,6              |
| CP 2                                    | 7            | 13,47                 |           |                  |
| CP 3                                    | 28           | 19,09                 | 18,73     | 0,72             |
| CP 4                                    | 28           | 18,37                 |           |                  |
| CP 5 Carbono                            | 32           | 32,44                 | 32,595    | 0,31             |
| CP 6 Carbono                            | 32           | 32,75                 |           |                  |
| CP 7 Aramida                            | 32           | 26,73                 | 27,375    | 1,29             |
| CP 8 Aramida                            | 32           | 28,02                 |           |                  |

Fonte: Autor (2020).

Os resultados de discrepância mostram a proximidade entre um corpo de prova e outro de mesma idade ou reforço, descrevem que mesmo com um ganho tão alto de resistência com a fibra de carbono, estes foram os que menos tiveram diferença entre si, comprovando a qualidade de aplicação.

## CUSTO PARA IMPLEMENTAÇÃO EM UM PILAR

Com base nos gastos para o experimento e de cada corpo de prova, foi estimado os custos com o reforço de um pilar de seção 20x40 com 3 metros de altura. O Quadro 3 apresenta o valor de reforço com fibra de carbono.

Quadro 3: Custo de material para reforço de pilar em fibra de carbono

Custo de material para reforço em pilar de dimensões 20x40x300 com Fibra de Carbono

|                                       | QTD. 1ª camada | Valor 1ª camada | QTD. 2ª camada | Valor 2ª Camada |
|---------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Fibra de Carbono (m <sup>2</sup> )    | 3,6            | R\$ 1.197,79    | 7,2            | R\$ 2.395,58    |
| Resina Epoxi (kg)                     | 2,268          | R\$ 174,41      | 5,4432         | R\$ 348,82      |
| Tecido <i>peel ply</i> m <sup>2</sup> | 3,96           | R\$ 77,22       | 3,96           | R\$ 77,22       |
| Filme perfurado m <sup>2</sup>        | 3,96           | R\$ 97,30       | 3,96           | R\$ 97,30       |
| Manta breather m <sup>2</sup>         | 3,96           | R\$ 35,28       | 3,96           | R\$ 35,28       |
| Filme de vácuo m <sup>2</sup>         | 8,64           | R\$ 210,82      | 8,64           | R\$ 210,82      |
| Valores totais                        |                | R\$ 1.792,82    |                | R\$ 3.165,02    |

Fonte: Autor (2020).

O Quadro 4 a seguir apresenta o valor de reforço com fibra de aramida.

Quadro 4: Custo de material para reforço de pilar em fibra de aramida.

Custo de material para reforço em pilar de dimensões 20x40x300 com Fibra de Aramida

|                                       | QTD. 1ª camada | Valor 1ª camada | QTD. 2ª camada | Valor 2ª Camada |
|---------------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Fibra de Aramida (m <sup>2</sup> )    | 3,6            | R\$ 401,26      | 7,2            | R\$ 802,51      |
| Resina Epoxi (kg)                     | 2,268          | R\$ 174,41      | 5,4432         | R\$ 348,82      |
| Tecido <i>peel ply</i> m <sup>2</sup> | 3,96           | R\$ 77,22       | 3,96           | R\$ 77,22       |
| Filme perfurado m <sup>2</sup>        | 3,96           | R\$ 97,30       | 3,96           | R\$ 97,30       |
| Manta breather m <sup>2</sup>         | 3,96           | R\$ 35,28       | 3,96           | R\$ 35,28       |
| Filme de vácuo m <sup>2</sup>         | 8,64           | R\$ 210,82      | 8,64           | R\$ 210,82      |
| Valores totais                        |                | R\$ 996,28      |                | R\$ 1.571,95    |

Fonte: Autor (2020).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude dos resultados apresentados nos ensaios de compressão dos corpos de prova, entende-se que, o melhor material compósito para a utilização em reforço estrutural se trata da fibra de carbono, devido ao fato de que, além desta ter uma resistência maior, a mesma agir em uma situação de esforço da mesma forma que age o concreto, de uma forma rígida. A sua característica principal por ser usada em outros campos da indústria e engenharia é justamente a altíssima resistência e leveza em comparação com outros materiais, metálicos por

exemplo. Confere ao engenheiro nestes casos de reforços, utiliza-la de maneira correta, respeitar os seus limites e dar preferência para uma aplicação o mais perfeita possível.

A importância desta característica como material é de que, o concreto podendo ser confinado neste material, poderá obter uma resistência elevada e não prejudicar a estética da estrutura, muitos são os problemas com reforços estruturais convencionais quanto a este empecilho estético. A questão de valores é relativa, a fibra de carbono é a mais cara entre as duas, porém é a que apresenta os melhores resultados, contando que os custos de implantação não se comparam a possibilidade de colapso ao não utilizar os reforços. Conclui-se a partir destes fatos que a fibra de carbono é o melhor material compósito para a utilização em reforços estruturais.

## REFERENCIAS

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Notas de Aula, Curso de Engenharia Civil – Universidade do Estado de São Paulo, Bauru. 2006.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

FILGUEIRA, Daniel Lucas; LEITE, Isabele Nocrato; ARAÚJO, Tereza Denyse Pereira. **AVALIAÇÃO NUMÉRICA DE PILARES DE CONCRETO REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO**. 2017. Artigo Científico (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo: Viapol, 2010.

SÁ, Stéphanie Cardoso de. **Compostos de SBR reforçados com fibra aramida curta**. 2015. Monografia (Curso de Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

SARAIVA, Victor Alexandre Henrique Silva. **Sistema de recuperação e reforço estrutural de concreto armado**. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2016

SIEBEL, Guilherme. **O processo de fabricação de um compósito por laminação a vácuo (vacuum bag)**. GAS Engenharia, 2018. Disponível em: < <https://www.gas-eng.com.br/post-unico/2018/06/04/O-processo-de-fabrica%25C3%25A7%25C3%25A3o-de-um-comp%25C3%25B3sito-por-lamina%25C3%25A7%25C3%25A3o-a-v%25C3%25A1cuo-vacuum-bag>. Acesso em: 13 set. 2020.

SOUZA, Vicente Custodio Moreira; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. Edição padrão. São Paulo: Pini, 1998.

TANNER, David; FITZGERALD, James A.; PHILLIPS, Brian R. The kevlar story—an advanced materials case study. **Angewandte Chemie International Edition in English**, Londres. v. 28, n. 5, p. 649-654, 1989.