

ESTUDO TEÓRICO DE REFORÇO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

*Ricardo José Carvalho Silva¹
Carla Simone de Albuquerque²*

RESUMO - A necessidade de se reforçar uma estrutura ocorre a partir do momento em que o elemento estrutural não é mais capaz de suportar o aumento de esforços. Este trabalho visa a complementar os estudos teóricos sobre reforço, assim como avaliar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas mediante três técnicas distintas de reabilitação: adição de barras de aço de diferentes diâmetros, chapas de aço e lâminas de fibras de carbono, utilizando também adesivo de base epóxi e parafusos autofixantes. Alguns ensaios realizados por pesquisadores foram analisados e comparados em relação às vantagens e desvantagens dos diferentes reforços utilizados. Dessa forma, pretende-se mostrar a importância do reforço de vigas em concreto armado, assim como verificar o uso de materiais adequados para possibilitar uma melhor avaliação do comportamento estrutural nas vigas. Palavra-Chave: Vigas. Concreto Armado. Estrutura. Reforço.

1 INTRODUÇÃO

É comum nas estruturas de concreto armado a ocorrência de patologias associadas a falhas de projeto ou à incidência de agentes agressivos nos elementos estruturais. Resistência e durabilidade são algumas das principais características do concreto armado; por isso é considerado um dos materiais mais importantes para a engenharia estrutural. Devido a essa característica, muitos acham que é um material eterno. Logo, é necessário esclarecer que as estruturas construídas com concreto armado não são eternas, pois com o passar do tempo elas se deterioram e, dessa forma, precisam de conservação e manu-

¹ Professor doutor, curso de engenharia civil, Universidade Estadual Vale do Acaraú. E-mail: ricardo.carvalho222@gmail.com, Sobral-CE.

² Aluna de graduação, iniciação científica, curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Vale do Acaraú. E-mail: carla19matematica@gmail.com, Sobral-CE.

Engenharias/Engenharia Civil

tenção, para que possam ter a vida útil para a qual foram projetadas, sendo necessária também uma boa execução de projeto para evitar uma degradação prematura.

A necessidade de reparar estruturas de concreto armado é uma realidade frequente. Reforçar estruturas de concreto armado tem sido uma das mais importantes atividades da Engenharia civil. Neste trabalho será apresentado o reforço com barras de aço de diferentes diâmetros, chapas de aço e fibras de carbono em vigas de concreto armado.

Essas técnicas se caracterizam pela união dos elementos de reforço à superfície de concreto por meio de uma resina à base de epóxi com grande capacidade de aderência. Essa resina é um elemento de grande importância para a execução do reforço, pois ela é a responsável pela transmissão integral dos esforços do elemento a ser reforçado para o elemento de reforço.

O objetivo maior desta pesquisa é mostrar a importância do reforço de vigas em concreto armado, assim como verificar o uso de materiais adequados, para possibilitar uma melhor avaliação do comportamento estrutural nas vigas.

2 REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

As patologias apresentadas por algumas estruturas e a necessidade de aumento da capacidade de carga de outras fizeram com que diversas técnicas fossem desenvolvidas para o reforço de vigas de concreto armado. Inúmeros estudos têm demonstrado que atualmente existe uma enorme quantidade de estruturas de concreto armado inadequadas ao uso. Dentre os motivos que provocam esta inadequação, podem ser citados: erros de projeto e de execução, utilização indevida, ausência de manutenção e danos acidentais (incêndios ou colisões). No reforço de uma estrutura de concreto armado, faz-se necessária a identificação do tipo de solicitação que está sobrecarregando a peça, podendo ser: momento fletor, esforço cortante, momento torçor, esforço normal ou mais de uma solicitação simultânea. Para cada situação haverá um tipo de reforço estrutural que se adequará melhor técnica e economicamente.

Segundo Campos (2006), quando se fala em manutenção, recuperação ou restauração de estruturas, torna-se necessário conhecer os principais materiais utilizados na sua construção, de forma que um perfeito entendimento da solução estrutural inicial possa ser obtido, facilitando assim a escolha do material a ser utilizado no processo de reabilitação.

Estruturas de concreto estrutural, assim como qualquer material construtivo, possuem uma vida útil estimada em função da sua utilização em serviço. Entende-se por vida útil o período de tempo durante o qual as características das estruturas de concreto são mantidas, sem exigir medidas extras de manutenção e reparo. A norma brasileira NBR 6118 (2014) estabelece como exigências de durabilidade que as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto, e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante um período mínimo de 50 anos, sem exigir medidas extras de manutenção e reparo.

Quando uma estrutura não é mais capaz de resistir às cargas a que está submetida, ou quando estas são indevidamente aumentadas, torna-se necessário reforçá-la. O reforço pode ser executado por diversos materiais, como: concreto, barras de aço, chapas metálicas, compósitos de fibras e resinas.

2.1 Reforço mediante aplicação de barras de aço e adesivo estrutural

A reabilitação de vigas através da adição de barras de aço e adesivo estrutural de base epóxi é objeto principal deste trabalho. De acordo com Almeida (2001), essa técnica de reforço é executada sem aumento da seção e deve ser realizada por meio da abertura de sulcos longitudinais na face da viga que apresenta deficiência de armaduras. Nesses sulcos são introduzidas as armaduras de reforço, preenchendo-se, posteriormente, os espaços vazios com adesivo estrutural epóxi ou com argamassa expansiva de alta resistência, para evitar retração.

Dentre as principais vantagens desse reforço, destaca-se o amplo conhecimento dos materiais e das técnicas utilizadas, o baixo custo quando comparado a outras técnicas de reforço e a rapidez na execução. Deve-se salientar que as armaduras podem ser distintamente solicitadas, especificamente se a viga não foi totalmente descarregada antes da intervenção. Este método apresenta a vantagem de não aumentar a altura da viga, não interferindo na estética da estrutura nem intervindo em outros elementos estruturais para a realização da reabilitação.

O reforço por meio de barras de aço e adesivo estrutural pode ser muito eficiente, considerando que os materiais empregados têm propriedades que favorecem a reabilitação da estrutura, principalmente quando se trata de reforço à flexão de vigas, visto que o aço é muito resistente a solicitações de tração. Para intensificar a ação do aço, utiliza-se o adesivo estrutural de base epóxi, que, além de aumentar a resistência mecânica, proporciona uma excelente aderência do reforço ao concreto, pois de acordo com Escobar (2003), a função do adesivo é garantir a aderência do aço com o concreto, estabelecendo, assim, a integridade do conjunto reforço/epóxi/concreto.

A escolha do adesivo a ser utilizado é importantíssima, uma vez que uma grande parte do comportamento mecânico do reforço depende dele. Logo, é extremamente necessário conhecer as propriedades das resinas epoxidadas, bem como seu funcionamento. Devido a sua consistência firme, costuma-se usar em obras a resina epóxi Sika-dur 31, visto que esta não é tão fluida quanto as demais variações do produto, oferecendo a consistência ideal para reforço em elementos estruturais verticais, bem como na face inferior de vigas. Conforme o fabricante, não é necessária a aplicação de resina de imprimação neste sistema de reforço, nem a utilização de argamassa de regularização.

2.2 Reforço por adição de chapas de aço coladas

Esta técnica surgiu em torno dos anos 1960, e desde então várias pesquisas foram realizadas para estudar o comportamento da estrutura reforçada.

Segundo Silveira (1997), ao mesmo tempo em que França e África do Sul desenvolviam seus trabalhos, nas décadas de 1970 e 1980, foi com os pesquisadores ingleses, como R. N. Swamy, R. Jones e G. C. Mays, que a técnica das chapas coladas teve um nível de utilização prática antes não alcançado, isso porque foi realizada uma série de ensaios e, conseqüentemente, um grande número de dados que possibilitaram ajustar um modelo matemático com resultados confiáveis.

O reforço por adição de chapas metálicas coladas é caracterizado pela união da superfície de concreto a chapas de aço através de uma resina com alta capacidade de adesão e resistência mecânica. É uma opção para reforço de elementos de concreto, de rápida e simples execução, recomendada principalmente quando é necessário reforçar a estrutura em um tempo curto ou não é possível fazer grandes alterações na geometria da peça. No final do processo, tem-se um elemento estrutural composto por concreto-resina-aço, o que possibilita à estrutura uma resistência maior ao esforço cortante e ao momento fletor. É de fundamental importância que a resina utilizada para fazer a colagem concreto-aço seja de qualidade comprovada e a superfície do concreto e do aço sejam preparadas.

2.3 Reforço com fibras de carbono

As fibras de carbono começaram a ser comercializadas no princípio da década de 1960, após extenso programa de pesquisa desenvolvido nos Estados Unidos, Inglaterra e Japão (EMMONS *et. al.* 1998).

A ideia de reforçar estruturas de concreto armado com fibras de carbono surgiu no início dos anos 1980 no Japão. Os abalos sísmicos nessa região da Ásia, causando diversos danos às estruturas, mostraram a necessidade de recuperação e reforço em curto intervalo de tempo. Esses foram os principais aspectos considerados para utilização desse material no confinamento de pilares (MACHADO, 2002).

As fibras de carbono podem ser também utilizadas para o aumento da capacidade resistente à flexão e ao esforço transversal de

Engenharias/Engenharia Civil

vigas e lajes, processo que, no entanto, exige muito cuidado no desenvolvimento dos detalhes que devem ser adotados para o sistema de amarração do compósito, assim como a mais detalhada análise das tensões de deslizamento na interface entre o compósito e o concreto (SOUZA, et. al. 1999).

Quando se faz a opção por recuperar uma estrutura de concreto, deve-se procurar empregar técnicas e materiais que proporcionem as propriedades mecânicas desejadas e o maior período de vida útil possível. Por esse motivo, o uso do concreto reforçado com fibras tem se mostrado uma alternativa interessante.

3 MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS

Não se pode dizer que o interesse pelas causas e formas de solucionar a degradação de estruturas de concreto armado é recente. Já em 1856, Robert Stevenson, presidente do Instituto Britânico de Engenharia, recomendava que os acidentes ocorridos deviam ser estudados, analisados e divulgados, pois nada seria tão útil e instrutivo para os profissionais da engenharia como o conhecimento deles e os meios empregados em sua reparação (CÁNOVAS 1988). Apesar disso, somente após o colapso de grandes estruturas que ocorreram em todo o mundo, percebeu-se com mais intensidade o surgimento de empresas especializadas em diagnosticar as causas da degradação e as formas de reabilitar estruturas de concreto. Entretanto, ainda existe uma grande carência de conhecimento a respeito de como se comportam as estruturas reabilitadas. A análise destes dados permitirá verificar se há diferenças entre o comportamento das vigas reabilitadas e o comportamento observado nos programas experimentais desenvolvidos por alguns pesquisadores.

3.1 Reabilitação por adição de barras de aço

Em relação à reabilitação de vigas por adição de barras de aço de diferentes diâmetros e adesivo de base epóxi, analisou-se o trabalho realizado por CARNEIRO (2013).

3.1.1 Ensaios realizados por Carneiro (2013)

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram ensaiadas pelo método de “ensaio de Stuttgart” quatro vigas de seções transversais retangulares medindo 10 cm x 15 cm e 80 cm de vão, ilustradas na Figura 1. O detalhamento das armaduras das vigas é mostrado na Figura 2. Deste modo, foi possível estudar o reforço na região submetida à flexo-compressão sem a presença do esforço cortante, no segmento central do vão, e nas regiões submetidas ao esforço cortante constante, nos segmentos externos da viga.

Figura 1 - Vigas que foram ensaiadas (CARNEIRO, 2013)

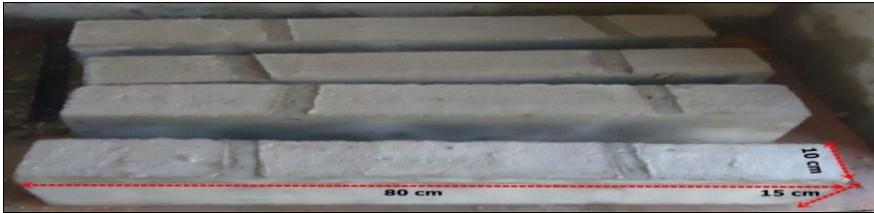
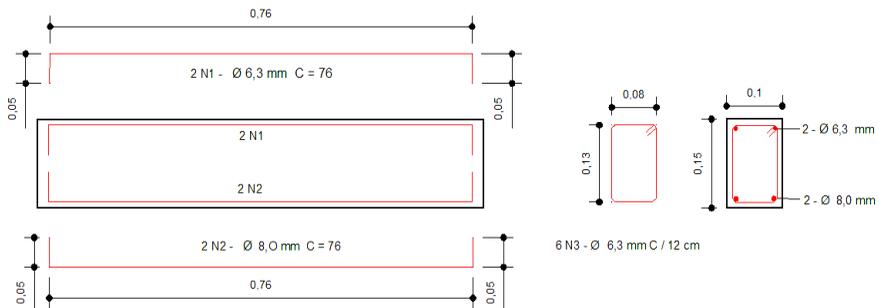


Figura 2 - Detalhamento das armaduras das vigas (CARNEIRO, 2013).

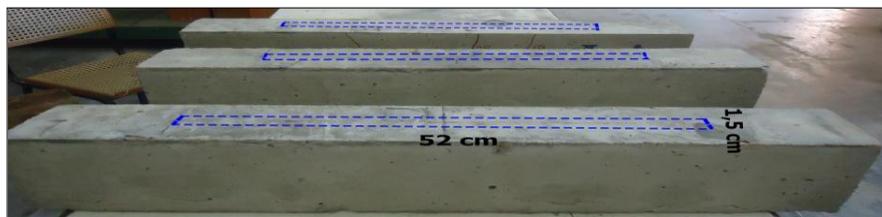


Engenharias/Engenharia Civil

Na primeira etapa dos ensaios, as três vigas que seriam reforçadas foram devidamente posicionadas na prensa hidráulica, onde receberam uma carga inicial de 5 kN, que logo em seguida foi retirada, procedimento realizado a fim de acomodar os materiais da viga e garantir a eficácia nos resultados do ensaio. Posteriormente, aplicou-se carga de forma progressiva até atingir o valor 50 kN com o intuito de pré-fissurar as vigas, uma por vez.

O reforço das vigas V2, V3 e V4 foi feito através da adição de barras de aço de 50 cm de comprimento e diâmetro de 16 mm, 12,5 mm e 8 mm, respectivamente, fixadas com o adesivo estrutural de base epóxi. O procedimento de reabilitação se deu logo após o pré-fissuramento das vigas, que em seguida foram posicionadas e receberam a prévia marcação de 52 cm centralizados, para aplicação do reforço, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Marcação de 52 cm para abertura dos sulcos (CARNEIRO, 2013).



Inicialmente foram feitas aberturas de sulcos longitudinais na face da viga. No momento da abertura dos sulcos, os quatro estribos centrais foram cortados, a fim de que o aço utilizado como reforço pudesse ser fixado de forma correta. Vale salientar que tal procedimento não debilita a armadura transversal, visto que o adesivo estrutural promoverá a reabilitação destes, promovendo uma união eficiente entre aço e concreto. Em seguida, prosseguiu-se com a limpeza dos sulcos, de modo a eliminar qualquer resquício de material que pudesse interferir na aderência do reforço.

O adesivo estrutural utilizado foi o Sikadur 31, visto que oferece a consistência ideal para reforço em elementos verticais, assim co-

mo na face inferior de vigas. Para aplicação do reforço nas três vigas, foi utilizada uma embalagem (A + B) de 1 kg do produto. Inicialmente efetuou-se a homogeneização dos componentes A e B separadamente e, em seguida, foram misturados até obter um material uniforme, homogêneo e sem grumos. A mistura da resina de base epóxi (embalagem A) com o endurecedor (embalagem B) foi realizada manualmente por cinco minutos após a abertura dos sulcos, de acordo com as indicações do fabricante. Em cada sulco foi aplicada, por meio de uma espátula, uma camada de aproximadamente 2 mm do adesivo estrutural epóxi, e logo após foi introduzido o aço de forma centralizada e equidistante dos extremos entre as armaduras positivas da viga, preenchendo-se, posteriormente, os espaços vazios com o mesmo produto. A Figura 5 ilustra as vigas já reforçadas em fase de cura.

Figura 5 – Vigas, já reforçadas, em fase de cura (CARNEIRO, 2013).



A terceira etapa dos ensaios ocorreu sete dias após a aplicação do reforço, período em que ocorre a cura final do adesivo estrutural. Verificava-se o surgimento de fissuras, bem como a evolução das já existentes, sempre demarcando-as com o auxílio de um pincel na cor azul, procedendo-se dessa forma até à ruptura das vigas, conforme ilustram as Figuras 6, 7, 8 e 9. Desse modo, foi possível fazer uma análise do modo de ruptura, verificar a aderência do reforço e a resistência mecânica das mesmas.

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais mostram os valores de resistência à compressão e à tração do concreto, bem como

Engenharias/Engenharia Civil

Figura 6 – Viga V1 após ruptura (CARNEIRO, 2013).



Figura 7- Viga V2 após ruptura (CARNEIRO, 2013).



Figura 8 - Viga V3 após ruptura (CARNEIRO, 2013).

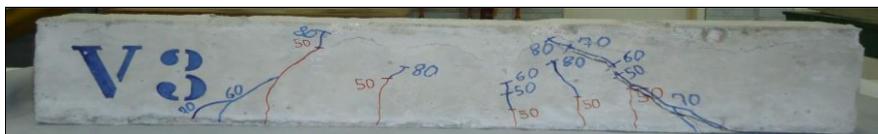


Figura 9 - Viga V4 após ruptura (CARNEIRO, 2013).



os mecanismos de ruptura das vigas submetidas ao “ensaio de Stuttgart”. Analisando-se esses resultados, foram identificadas as causas de ruptura do elemento estrutural e avaliada a eficiência do reforço aplicado. Nos “ensaios de Stuttgart” reproduzidos em laboratório, foram verificados dois mecanismos de ruptura nas vigas estudadas, a saber:

flexo cisalhamento e cisalhamento. As três vigas que seriam reforçadas foram submetidas a um ensaio de pré-fissuração com aplicação de carga de 50 kN, posteriormente foram reabilitadas e, após o período de cura, submetidas ao ensaio de ruptura, enquanto a viga de referência foi submetida apenas ao ensaio de ruptura.

A viga V1 é a referência como parâmetro para as demais vigas ensaiadas. Por meio do “ensaio de Stuttgart”, foi aplicada carga na viga a uma taxa de 10 kN em 10 kN. Sob um carregamento de 20 kN não se observou nenhuma fissura. Com o aumento do carregamento até 30 kN, o concreto sofreu plastificação e esgotou sua resistência à tração, ocasionando o aparecimento da primeira fissura. Ao prosseguir-se o ensaio, mais fissuras foram surgindo e as que já existiam eram intensificadas, quando as tensões normais de tração passaram a ser absorvidas pela armadura longitudinal. A viga manteve-se no carregamento de serviço até atingir 120 kN com o aparecimento de um total de 20 fissuras visíveis. Ao intensificar-se a carga, a viga sofreu a ruptura com uma carga de 138 kN e passou a apresentar 22 fissuras visíveis, como mostra a Figura 6.

A viga teve uma ruptura por flexo-cisalhamento com deformação plástica excessiva do aço; isso se deve ao fato de o espaçamento dos estribos ter sido possivelmente alterado, concentrando-se a maior parte destes próximo aos pontos de aplicação de carga, aumentando a resistência da viga à flexão e promovendo um rompimento por flexo-cisalhamento, em vez de rompimento por flexão, como era esperado.

A viga V3, mostrada na Figura 8, assim como a viga V2 (Figura 7) e V4 (Figura 9) foi inicialmente pré-fissurada através de uma carga de 50 kN antes da aplicação do reforço, e surgiram 5 fissuras. Sua reabilitação consistiu na adição de aço de diâmetro 12,5 mm e adesivo estrutural de base epóxi. O aço foi inserido entre as armaduras positivas de forma centralizada distante 15 cm das extremidades e 4,37 cm das laterais.

Na última etapa de ensaios, a viga V3 recebeu carga até a sua ruptura. Vale salientar que surgiram pouquíssimas fissuras entre os pontos de aplicação de carga, como mostra a Figura 8. Verifica-se, portanto, que o reforço foi eficiente, protegendo a viga de uma ruptu-

Engenharias/Engenharia Civil

ra por flexão e causando pouca deformação nesta, uma vez que a armadura longitudinal não atingiu seu patamar de escoamento, mantendo-se no regime elástico. A peça rompeu por cisalhamento devido à baixa taxa de armadura transversal, como já era esperado.

O que se pode destacar das vigas V4 e V3, assim como na viga V2, em comparação com a viga V1, é o fato de o aparecimento de fissuras na região de flexão pura ter sido imensamente reduzido. Quanto à carga de ruptura de V3 ter sido inferior à de V1, existe uma possível explicação para isso: o pré-fissuramento pode ter reduzido a resistência mecânica da viga V3, provocando uma deformação plástica da mesma.

Através dos resultados dos ensaios, pode-se observar que o mecanismo de ruptura das vigas reforçadas (V2, V3 e V4) foi por cisalhamento, e a carga de ruptura destas pode se considerar que foi a mesma, uma vez que apenas a viga V3 teve uma pequena variação no valor, sendo este 90 MPa, que pode ser desconsiderado, visto que ficou muito próximo da média das cargas de ruptura das vigas reforçadas de 93,3 MPa. Portanto, percebe-se que a diferença de diâmetro do aço não alterou nem na aderência do reforço, nem no aumento da resistência mecânica da viga.

3.2 Reabilitação por adição de chapa de aço

Em relação à reabilitação de vigas por adição de chapas de aço, parafuso e adesivo de base epóxi, analisou-se o trabalho realizado por CAMPAGNOLO (1997).

3.2.2. Ensaios realizados por CAMPAGNOLO (1997)

No artigo apresentado por CAMPAGNOLO na XXVIII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, descreve-se o reforço de vigas por meio de chapas de aço fixadas com parafusos, utilizando ou não resina epóxi.

No total foram ensaiadas 4 vigas (Quadro 1) com seção transversal retangular de 12cm x 25cm, comprimento total de 2,50 m e vão

livre de 2,35 m. As vigas foram submetidas a duas forças concentradas aplicadas a 78,5 cm a partir do apoio. A armadura longitudinal foi composta por duas barras de aço CA-50, de 10 mm de diâmetro, posicionadas no banzo tracionado e por duas barras de 6,3 mm, aço CA-50, colocadas no bordo comprimido. A armadura transversal consistia de estribos de 6,3 mm espaçados a cada 11 cm. As resistências ao escoamento para barras de 10 mm e 6,3 mm foram respectivamente 549 MPa e 657 MPa. As chapas de aço utilizadas no reforço tinham 2,20 m de comprimento, 12 cm de largura e 2,8 mm de espessura, com tensão média de escoamento de 326 MPa. Os parafusos autofixantes utilizados tinham 8 mm de diâmetro e 80 mm de comprimento, com resistência ao cisalhamento de 13,5 kN, e ao arrancamento, de 14,3 kN. O uso de parafusos neste tipo de reforço foi introduzido por uma questão operacional, sendo responsáveis por manter a chapa na posição correta e sob pressão até o endurecimento da formulação epóxi, não sendo mais necessários após o endurecimento da resina. Entretanto, como o adesivo epóxi pode se deteriorar se exposto a elevadas temperaturas, os parafusos devem ser mantidos para minimizar o risco de colapso da estrutura no caso de incêndios. Inclusive, de acordo com algumas referências, recomenda-se o dimensionamento do número e do diâmetro dos parafusos para resistir à carga total do reforço, desprezando a colaboração da resina, delegando a estes elementos uma função estrutural. Por este motivo, Campagnolo levantou dúvidas a respeito da real necessidade da resina no reforço, uma vez que a reabilitação fica com resistência superior à necessária, e se propôs a investigar essa questão.

Quadro 1 - Características das vigas ensaiadas por CAMPAGNOLO (1997)

Vigas	Características
V1	Vigas sem reforço
V2	Reforçada com chapa de aço colada com resina epóxi
V3	Reforçada com chapa de aço com parafusos autofixantes
V4	Reforçada com chapa de aço coladas com resina epóxi e fixada com parafusos autofixantes

Engenharias/Engenharia Civil

Os resultados experimentais foram comparados com previsões teóricas obtidas a partir da utilização de diferentes modelos. O detalhamento das vigas ensaiadas e a posição dos parafusos usados nas chapas de aço estão ilustrados nas Figuras 10, 11 e 12.

Figura 10 - Armadura longitudinal e reforço (CAMPAGNOLO, 1997).

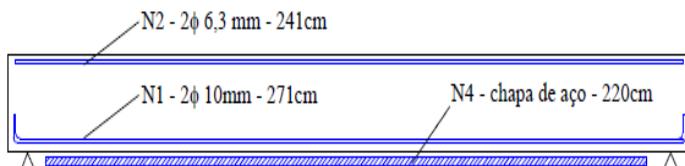


Figura 11 - Armadura transversal e reforço (CAMPAGNOLO, 1997).

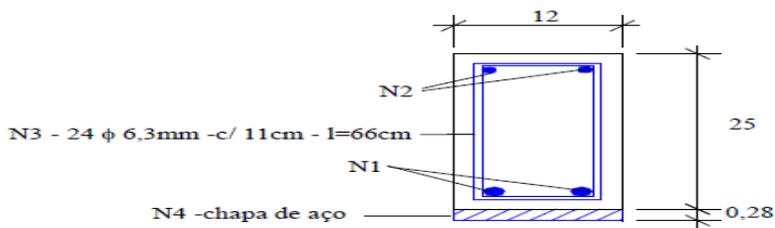
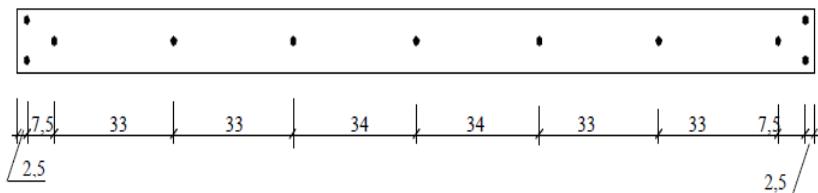


Figura 12 - Posição dos parafusos nas chapas das vigas V3 e V4 (CAMPAGNOLO, 1997).



É interessante observar que a força de ruína da viga V2 foi muito próxima do valor previsto para o descolamento da chapa de aço. Neste caso, a separação da chapa aconteceu simultaneamente ao rompimento da viga. A diferença básica entre o comportamento das vigas V2 e V4 foi que, para esta última, não houve descolamento da chapa de aço no instante da ruína, indicando que os parafusos autofixantes, apesar de não aumentarem a capacidade última da peça reabilitada, conseguem melhorar as condições de ancoragem da chapa de aço, evitando o destacamento de suas extremidades.

Observando a evolução das flechas, Campagnolo verificou uma boa aproximação entre os valores previstos e os experimentais. Observou ainda que este tipo de reforço, além de incrementar a máxima capacidade portante das vigas, também aumenta significativamente a rigidez das mesmas. No caso da viga V3, reforçada com chapa fixada apenas por parafusos, obteve-se a menor rigidez, sendo as flechas experimentais maiores que as determinadas teoricamente. Isto ocorreu porque a chapa não estava perfeitamente aderida ao concreto do substrato, uma vez que sua fixação foi feita apenas através de parafusos, permitindo o deslizamento relativo da chapa em relação à viga. Este comportamento também fica confirmado ao se compararem os valores experimentais e teóricos das deformações na armadura longitudinal tracionada no meio do vão.

Diante destas observações, o autor concluiu que a resina é realmente necessária para garantir um bom desempenho do elemento reforçado, pois a fixação da chapa apenas com parafusos não proporciona o mesmo incremento de rigidez para a viga reabilitada. Além disso, a resina proporciona um comportamento solidário da peça devido à aderência, distribuindo melhor os esforços na estrutura.

Outro aspecto a ser ressaltado é a importância de uma ancoragem adequada da chapa de reforço para garantir que os esforços na extremidade deste elemento sejam transmitidos ao corpo da viga. Esta ancoragem pode ser feita pela colocação de chapas coladas nas laterais da viga ou por parafusos (conforme constatado na viga V4). A não utilização destes dispositivos pode conduzir a uma separação prematura da chapa.

3.3 Reabilitação por adição de lâminas de fibra de carbono

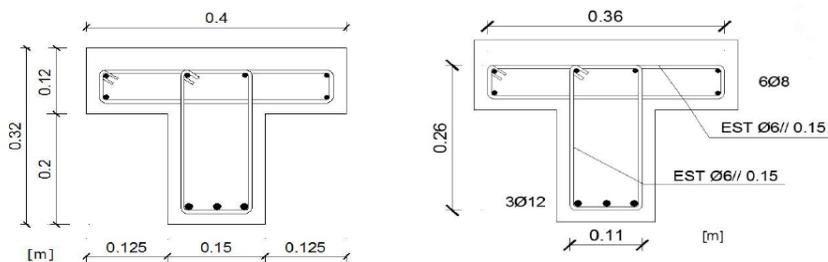
Em relação à reabilitação de vigas por adição de lâminas de fibra de carbono, analisou-se o trabalho realizado por Duarte (2011).

3.2.2. Ensaio realizados por Duarte (2011)

Duarte realizou um trabalho cujo objetivo era estudar o reparo de fissuras por meio da injeção de resinas epóxicas e determinar a influência deste reparo no comportamento mecânico das vigas de concreto armado, quando aplicadas antes da operação do reforço com laminados de fibras de carbono.

O estudo experimental consistiu na ruptura por flexão de vigas de concreto armado referenciais, vigas que tenham sido fissuradas, reparadas e posteriormente reforçadas e vigas apenas fissuradas e reforçadas. No total, foram ensaiadas seis vigas, sendo 2 de referências – vigas V1 e V2, duas sujeitas a um carregamento de fissuração e reforçadas através da colagem de laminados de fibra de carbono – vigas V2 e V3 e duas sujeitas a carregamento de fissuração, posteriormente reparadas com injeção de resina epóxi nas fissuras e finalmente reforçadas através da colagem de laminados de fibra de carbono – vigas V5 e V6. O comprimento total das vigas era de 3,30 metros e sua seção transversal era tipo T. A figura 13 ilustra a geometria da seção transversal das vigas e o detalhamento das armaduras, respectivamente.

Figura 13 - Geometria da seção transversal e detalhamento de armadura (DUARTE, 2011).



Para o reforço por meio da injeção foi utilizada a resina epóxi Sikadur-52 de alta resistência e baixa viscosidade, desenvolvida para o preenchimento de fissuras e para o preenchimento dos orifícios resultantes da operação de injeção.

Os materiais utilizados no sistema de reforço de fibra de carbono foram laminados de fibra de carbono, e para a colagem estrutural dos laminados foi utilizada resina epóxi desenvolvida para colagem de laminados de fibra de carbono composta de dois componentes para mistura. As vigas foram ensaiadas à flexão conforme a Figura 14, com o carregamento aplicado através de um atuador hidráulico, de forma concêntrica e equidistante dos apoios. Durante os ensaios foram utilizados defletômetros a meio vão e nos pontos de carregamento da viga.

Figura 14 - Ensaio à flexão da viga de concreto armado (DUARTE, 2011).



Nas vigas V3 e V4 foi aplicado um carregamento pelo qual foi possível verificar fissuras com uma abertura aproximadamente igual a 0,3 mm. Em seguida, foram feitos furos interceptando os planos de fissuras nas laterais das vigas; posteriormente, através de injetores, foi inserida a resina, e logo após aplicada a argamassa para preenchimento dos furos, conforme a Figura 15.

Nas vigas V5 e V6 foi efetuado o mesmo procedimento usado para as vigas V3 e V4, e em seguida aplicado o reforço de fibras de

Engenharias/Engenharia Civil

carbono. Nesta operação foi seguido o procedimento recomendado pelo fabricante. O laminado foi colocado na viga na posição

Figura 15 - Aplicação de resina através de injetores (DUARTE, 2011).



pretendida, com algum cuidado, sendo segurado pelas suas extremidades, conforme Figura 16. Quanto à aplicação do laminado na viga, procurou-se não exercer pressão excessiva sobre o mesmo, de forma a não alterar a espessura da resina.

Figura 16 - Aplicação dos laminados de fibra de carbono (DUARTE, 2011).



Duarte verificou no seu estudo experimental uma rigidez inicial de 43% superior nas vigas reparadas, apresentando deformações inferiores para o mesmo nível de carregamento. Todavia, nas mesmas vigas, além de se assistir o escoamento das armaduras de tração para carregamentos inferiores, a redução de rigidez após o escoamento das armaduras é mais notória; no entanto, perto do ponto de ruptura, a deformação das vigas era semelhante em ambos os tipos de tratamento.

Duarte observou ainda que, por outro lado, a introdução de resinas nas fendas trouxe benefícios referentes à fissuração do concreto, visto que se verificou um reduzido surgimento de novas fissuras para as vigas reparadas, ao contrário do verificado nas vigas que não foram alvo de reparação, onde foi visível o aparecimento de fissuras na zona inferior, com o espaçamento reduzido entre as mesmas. Ainda que não tenha sido comprovado de forma evidente o aumento da resistência mecânica nas vigas reparadas, Duarte explica que se deve fazer a reparação das fissuras com injeção de resinas.

4 CONCLUSÃO

Os métodos de reforço apresentados neste trabalho são uma ótima alternativa quando não é possível modificar a geometria da seção transversal. Deve-se ter bastante atenção durante o processo executivo usando mão de obra qualificada para o procedimento, uma vez que o ponto mais importante, tanto para o reforço com fibras de carbono quanto para o reforço com chapa de aço e barras de aço, é a perfeita união entre o elemento de reforço e o elemento a ser reforçado (concreto), que é promovida pela resina epoxídica. Também é de fundamental importância que se faça um tratamento prévio da superfície de concreto para que as condições estabelecidas durante o processo de cálculo sejam atendidas.

De acordo com Carneiro (2013), de um modo geral, pode-se afirmar que o reforço por meio da adição de barra de aço e resina epóxi é eficiente, principalmente quanto à aderência, que se mostrou satisfatória, considerando que o adesivo estrutural não apresentou

Engenharias/Engenharia Civil

retração plástica e não houve arrancamento do reforço. Verificou-se também que o aumento do diâmetro das barras de aço utilizadas como reforço não alterou a resistência mecânica da peça nem apresentou variações quanto à aderência reforço-substrato. A reabilitação apenas mudou o mecanismo de ruptura das vigas, alertando para a aplicação de um reforço para a armadura transversal a fim de combater também o esforço cortante, para que, desse modo, a reabilitação seja ainda mais eficaz.

O reforço com lâminas de fibra de carbono aumenta a resistência das vigas à flexão, diminui o deslocamento, diminui a quantidade e as aberturas das fissuras, quando comparado com vigas sem reforço. Através dos resultados do estudo experimental, Duarte (2011) observou que não houve acréscimo de resistência mecânica nas vigas reparadas com resina epóxi e reforçadas com fibra de carbono quando comparadas com as vigas apenas reforçadas com fibra de carbono. Por outro lado, a rigidez inicial observada nas vigas reparadas é claramente superior à das vigas apenas reforçadas.

O reforço através de chapas de aço coladas com resina epóxi é, sem dúvida, mais simples de ser executado. Todavia, a possibilidade de substituir a resina pela argamassa eliminaria muitos problemas gerados pela dificuldade em se determinar qual a formulação adequada da resina em função das características ambientais. Além disso, Campagnolo (1997) indicou que mesmo as peças reforçadas com chapas de aço coladas com resina epóxi necessitam de dispositivos específicos de ancoragem. Isso acarretaria também trabalhos mais pesados de preparação de ancoragem em alguns trechos da viga, podendo ser usados parafusos autofixantes. Outro inconveniente que seria eliminado ao substituir a resina pela argamassa é a preocupação com elevadas temperaturas, o que pode provocar a deterioração da resina e, conseqüentemente, a separação da chapa de aço do substrato.

Compreende-se que a necessidade do desenvolvimento de alternativas para soluções de engenharia, como o reforço de vigas de concreto armado, é um caminho que deve ser percorrido. Para tanto, devem ser desenvolvidos estudos a fim de garantir resultados precisos, e conseqüentemente contribuir para o desenvolvimento de produtos,

métodos e processos que auxiliem na construção civil de forma eficaz e com qualidade.

Finalmente, constatou-se que o estudo desenvolvido, apesar de não esclarecer completamente todas as dúvidas sobre a reabilitação e reforço de vigas de concreto armado, forneceu informações interessantes que contribuíram, mesmo que de forma parcial, para esclarecer o comportamento de tais peças.

THEORETICAL STUDY OF STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

ABSTRACT – The necessity of reinforcing a structure occurs from the time when the structural member is no longer able to support the increase of effort. This work seeks to complement the theoretical studies of reinforcement, as well as evaluate the behavior of reinforced concrete beams strengthened by three different rehabilitation techniques: adding steel bars of different diameters, steel sheet and strip of carbon fiber, using also epoxy based adhesive and self-supporting screws. Some tests were conducted by researchers, analyzed and compared against the advantages and disadvantages of different reinforcements used. Thus, it is intended, throughout this research to show the importance of strengthening of reinforced concrete beams, as well as verify the use of suitable materials to enable a better assessment of structural behavior in beams.

Keywords: Beams. Armed concrete. Structure. Boost.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento NBR 6118, Rio de Janeiro, 2014.

ALMEIDA, T. G. M. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2001.

Engenharias/Engenharia Civil

CAMPOS, L. E. T. **Técnicas de recuperação e reforço estrutural com estruturas de aço**. Rio de Janeiro: PGE CIV, 2006.

CÁNOVAS, M.F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo: Pini, 1988.

CARNEIRO, D. C. **Estudo teórico-experimental do reforço de vigas através da adição de barras de aço e adesivo epóxi**. Sobral: UVA, 2013.

EMMONS, P.; THOMAS, J.; VAYSBURD, A. Muscle made with carbon fiber. **Civil Engineering**, jan. 1998.

ESCOBAR, C. J. **Avaliação do desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com lâmina de CFRP tensionada**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2003.

DUARTE, P. C. F. S. **Estudo experimental do efeito da reparação de fendas no comportamento de vigas de betão armado reforçadas a flexão com laminados de CFRP**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2011.

MACHADO, A. P. **Reforço de estrutura de construção armado com fibras de carbono**. São Paulo: Pini, 2002. 271 p.

SILVEIRA, S. S. **Dimensionamento de vigas de concreto armado reforçadas com chapas coladas com resina epóxi**. 1997. 120f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1997. 120 p. Disponível em <<http://www.infohab.org.br>>. Acesso em 25 março 2014.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998. 255 p.