

Análise de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com polímero de fibras de carbono

Analysis of Reinforced Concrete Beams with Polymer Carbon Fibers



Andrêssa Cristina Gonçalves

Graduanda do Curso de Engenharia Civil. andressa_cristina20@hotmail.com

Wesley de Sousa Araujo

Graduando do Curso de Engenharia Civil. wesley-araujo@hotmail.com

Renata de Oliveira Melo

Professora Especialista do Curso de Engenharia Civil. renataom@unipam.edu.br

RESUMO: O surgimento de deteriorações é comum nas estruturas ao longo do tempo, tornando indispensável o estudo sobre as técnicas de reforço estrutural. Dentre as estruturas, há as vigas de concreto armado que são submetidas às tensões de cisalhamento. Estas, por sua vez, resistem mal às tensões cisalhantes, podendo ser levadas a ruínas. Assim, o presente trabalho teve como objetivo analisar a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado, submetidas a reforço estrutural com PRFC do tipo laminado, bem como a sua viabilidade e praticidade. Para a análise moldaram-se doze vigas de concreto armado. Do total de vigas, três delas eram compostas de armadura completa e nove compostas com 70% da área de aço da armadura transversal. Destas, três foram reforçadas na posição de 90° e três na posição de 45°. Ainda, três destas não foram reforçadas para comparar a resistência que as vigas tiveram após o reforço.

PALAVRAS-CHAVE: Reforço Estrutural. Laminado de Carbono. Cisalhamento.

ABSTRACT: The appearance of deteriorations is commonly found in structures over time, turning the study of structural reinforcement techniques indispensable. Among the structures, there are the reinforced concrete beams that are subjected to shear stresses. These, in turn, resist poorly the shear stresses, and can be carried to ruins. Thus, the present work had as objective to analyze the shear strength of reinforced concrete beams, submitted to structural reinforcement with laminated type PRFC, as well as its viability and practicality. For the analysis, twelve reinforced concrete beams were molded. Of the total beams, three of them were composed of full armor and nine made up of 70% of the steel area of the transverse reinforcement. Of these, three were reinforced in the 90° position and three in

the 45° position. Still, three of these were not reinforced to compare the strength that the beams had after reinforcement.

KEYWORDS: Structural Reinforcement. Carbon Laminate. Shearing.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

No âmbito da engenharia civil, a modernidade em estruturas de concreto armado está cada vez mais presente. Surgem novas técnicas construtivas, e a busca por conhecimento para a obtenção de uma maior durabilidade destas estruturas é constante.

As estruturas de concreto armado podem necessitar de reforço estrutural por diversos fatores, como recuperar a carga portante, preparar a estrutura para receber uma sobrecarga ou corrigir algum erro durante a concepção/execução.

Dentre as possibilidades para o reforço estrutural, encontra-se o reforço por aumento da seção transversal, o reforço por aplicação de protensão externa, o reforço por adição de chapas e perfis metálicos e o reforço por adição de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC).

A respeito da adição de fibras, Furlan (1995) assegura que o aumento de resistência proporcionado por elas se deve à transferência de forças na superfície de ruptura. Essas forças são resistidas pelas fibras, que as transferem parcialmente à matriz da região íntegra através de tensões de interface, considerada intacta.

Em termos de resistência, as vigas de concreto armado podem sofrer vários tipos de ruínas, dentre elas se encontram as ruínas por flexão, as rupturas por falha de ancoragem no apoio, as rupturas por esmagamento da biela e as ruínas por cisalhamento, que em grande parte são causadas devido à deficiência da armadura transversal. Diante disso, viu-se a necessidade do estudo de reforço estrutural a cisalhamento em vigas de concreto armado, utilizando o PRFC do tipo laminado.

A importância deste trabalho refletiu-se no indispensável estudo sobre as técnicas de reforço estrutural em vigas de concreto armado, visto que é comum o surgimento de deteriorações e anomalias nas estruturas ao longo do tempo. Ainda, mediante os diferentes materiais que podem ser empregados para o aumento da vida útil da estrutura, enfatizou-se o PRFC, do tipo laminado, como alternativa de reforço estrutural a cisalhamento para vigas de concreto armado.

Neste presente trabalho objetivou-se o estudo do comportamento teórico experimental de vigas de concreto armado com reforço estrutural a esforço de cisalhamento. Ainda, os objetivos específicos foram a análise da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado, submetidas a reforço estrutural com PRFC, a verificação de qual posição em que o reforço foi colocado apresentou resultado mais satisfatório e a apuração da viabilidade e praticidade do uso do laminado de fibras de carbono como reforço estrutural a cisalhamento.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. DURABILIDADE NAS ESTRUTURAS DE CONCRETO DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil está presente em toda a história da humanidade. Inicialmente as construções eram rústicas e demandavam poucos recursos. Ao longo dos anos as técnicas construtivas se aprimoraram, contando com riquezas de detalhes e conhecimentos cada dia mais aprofundados. Em comum a todas as etapas evolutivas, encontra-se o objetivo de desenvolver estruturas que atendam às suas necessidades. Dentre estas, destaca-se a busca por maior conforto tanto para a moradia quanto para o ambiente de trabalho e a garantia de durabilidade da estrutura.

A durabilidade de uma estrutura de concreto armado é a capacidade de a estrutura manter as suas características estruturais e funcionais originais pelo tempo de vida útil esperado, nas condições de exposição para as quais foi projetada. É essencial que as estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto ou, pelo menos, razoável (OLIVEIRA, 2013, p. 24). De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 (p. 15), “a durabilidade das estruturas de concreto requer cooperação e atitudes coordenadas de todos os envolvidos nos processos de projeto, construção e utilização [...]”.

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 o prazo correspondente à sua vida útil (ABNT NBR 6118:2014, p. 15).

Diversos fatores contribuem para a durabilidade das estruturas de concreto armado, desde a correta fabricação e execução técnica do projeto, até a qualidade dos insumos utilizados em sua composição. Em termos da durabilidade das estruturas, para Souza e Ripper (1998, p. 19),

Serão a quantidade de água no concreto e a sua relação com a quantidade de ligante o elemento básico que irá reger características como densidade, compactidade, porosidade, permeabilidade, capilaridade e fissuração, além de sua resistência mecânica, que, em resumo, são os indicadores de qualidade do material, passo primeiro para a classificação de uma estrutura como durável ou não.

Levar em consideração a classe de agressividade do ambiente em que a estrutura estará inserida é fundamental para o aumento da sua durabilidade (AZEVEDO, 2011).

2.3. REFORÇO ESTRUTURAL

Com a modernidade, surgiram várias formas de se intervir na estrutura, aumentando a sua vida útil. Dentre elas encontra-se o reforço estrutural. De acordo

com Almeida (2001), independentemente da causa que leve à necessidade de se reforçar uma viga de concreto armado, pode-se distinguir entre o reforço ao momento fletor e o reforço ao esforço cortante. O reforço ao momento fletor pode ser necessário por insuficiência da armadura de tração ou por deficiência de mecanismos resistentes à compressão. Já no esforço cortante, é mais comum que se necessite de reforço devido à deficiência dos estribos.

Segundo Zucchi (2015), em algumas circunstâncias, o profissional pode se deparar com condições desafiadoras para a escolha mais adequada tanto da técnica de reforço, quanto do material que deverá ser utilizado. Ainda, segundo o mesmo autor, esses desafios podem ser devidos aos diferentes agentes agressivos a que o edifício pode estar exposto, à compatibilização de materiais, à necessidade de controle do excesso de peso e à dificuldade em vencer grandes vãos.

Qualquer técnica adotada requer como pressupostos principais do projeto a identificação das possíveis soluções, de forma a se obter um sistema coerente com o ambiente em que se insere a estrutura, respeitando-se o partido arquitetônico e balanceando-se quanto aos aspectos relativos a custos (REIS, 2001, p. 79).

A escolha de qual tipo de reforço utilizar vai depender de dois fatores predominantes. O primeiro será o objetivo do reforço, se é devido a erros de projeto e/ou execução, se é para recompor a capacidade portante, ou se é devido ao aumento de sobrecargas. O segundo serão o recurso financeiro disponível, os materiais encontrados na região, o tempo gasto, a mão de obra disponível, dentre outros motivos.

As etapas do projeto de reparo/reforço constituem-se nos seguintes itens: fazer o diagnóstico do problema e tomar as medidas emergenciais necessárias; verificar a viabilidade técnica e econômica do projeto; investigar o estado da estrutura; definir a melhor técnica, bem como materiais a utilizar; projetar, calcular e detalhar o reforço; executar o trabalho com um adequado controle de qualidade; e por fim, executar o projeto com controle de qualidade rigoroso (SANTOS, 2006, p. 1).

A respeito das técnicas de reforço, Almeida (2001, p. 7) diz: “Cada técnica possui suas vantagens e desvantagens, devendo-se avaliá-las de forma a escolher aquela que represente a melhor relação custo benefício e possa ser executada dentro do prazo requerido”. Carneiro (2006, p. 6), por sua vez, afirma que “são correntes as técnicas de reforço por aumento da seção transversal, por aplicação de protensão externa, por colagem de chapas de aço e, ultimamente, por colagem de polímeros reforçados por fibras (FRP)”.

2.3.4. Reforço estrutural com PRFC

Os PRFC são fibras encontradas na forma de tecido, lâmina ou pó, sendo que a principal diferença entre as formas que ele se apresenta é o processo executivo. Os tecidos podem ser aplicados em diversas camadas até atingir a espessura necessária para o reforço, desde que sejam bem aderidos ao substrato por meio de

resinas, enquanto as lâminas são aplicadas em uma única camada, e sua capacidade resistente varia de acordo com a espessura da lâmina (TIMERMAN, 2011).

De acordo com Ribeiro, Da Silva e Santos (2013), uma das causas do descolamento da camada de reforço acontece quando há uma má aderência entre a camada de concreto e a camada de PRFC. Nesse caso, as tensões de tração e cisalhamento que atuam na interface concreto/reforço superam a capacidade de aderência do material utilizado na colagem, podendo depender da qualidade do material, da execução do serviço ou do número de camadas.

As fibras estão imersas dentro de uma matriz polimérica. Essa matriz tem a função de proteger as fibras e transmitir as solicitações externas para as fibras, mantendo-as posicionadas corretamente para evitar propagação de fissuras e conseqüente ruptura do compósito (HOLLAWAY, 1991 *apud* BEBER, 2003).

Segundo Machado (2002), normalmente os sistemas compostos estruturados que utilizam as fibras de carbono como elemento resistente apresentam extraordinária resistência mecânica e rigidez, bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas, elevada resistência a ataques químicos diversos, e não sofrem corrosão, por se tratar de um produto inerte. Eles ainda apresentam estabilidade térmica e reológica e extrema leveza, devido ao baixo peso específico do sistema (da ordem de 1,6g/cm³ a 1,9g/cm³, cerca de 5 vezes menor do que o do aço estrutural), chegando-se até ao ponto de não se considerar o seu peso próprio nos reforços.

Os reforços com fibras de carbono nas vigas podem ter por finalidade absorver os esforços de tração devido aos momentos fletores positivos e negativos como também das tensões devido aos esforços de cisalhamento, sendo na maioria dos casos aplicados na parte externa dos elementos (RIBEIRO, 2012). Segundo Callister (2011), o PRFC possui o maior módulo específico e a maior resistência específica dentre todas as fibras de reforço.

As fibras são obtidas através de um processo térmico, e quanto maiores forem as temperaturas, maior será o módulo de elasticidade do material (HABITZREUTER, 2013). Porém, quanto maior o módulo de elasticidade, maior o custo do processo (MACHADO, 2002).

Romero (2007) cita como desvantagens deste material o elevado custo, a dificuldade de visualização das fissuras quando utilizados o tecido e o coeficiente de dilatação diferente do concreto, e por fim, a possibilidade de destacamento prematuro nas bordas devido às tensões.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, foram obtidos dados experimentais através de ensaios realizados no Laboratório de Análises Tecnológicas dos Materiais do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM), com embasamento na fundamentação teórica, para melhor entendimento e realização.

Inicialmente fez-se o dimensionamento das armaduras das vigas de concreto armado. Os cálculos utilizados para este dimensionamento foram realizados com equações simplificadas em concordância com a NBR 6118:2014. Após a realização dos cálculos, tornou-se possível a obtenção da área de aço necessária para as vigas, como pode ser visto no Quadro 1.

QUADRO 1. Dimensionamento da armadura transversal e longitudinal

Armadura	Área de aço (cm ² /m)	Quantidade	Diâmetro (mm)
Longitudinal superior	Apoio para os estribos	2 barras	05
Longitudinal inferior	1,51	2 barras	10
Transversal (completa)	2,73	14 estribos	05
Transversal (70%)	1,68	9 estribos	05

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Para as armaduras, utilizou-se o aço CA 50. Foram feitas três armaduras compostas de duas barras longitudinais de 10 mm de diâmetro na parte inferior, duas barras longitudinais de 5 mm de diâmetro na parte superior, contando com 14 estribos espaçados igualmente. Com essas armaduras, moldaram-se três vigas com armadura completa, suficientes para resistir aos esforços solicitantes.

Para possibilitar a verificação do desempenho do reforço estrutural com laminado de carbono, fora feitas nove armaduras com deficiência de estribos, utilizando apenas setenta por cento (70%) da área de aço total necessária para que a viga resista aos esforços cortantes. Essas armaduras foram compostas de duas barras longitudinais de 10 mm de diâmetro na parte inferior, duas barras longitudinais de 5 mm de diâmetro na parte superior, contando com nove estribos espaçados igualmente.

Em seguida, as vigas de concreto armado foram moldadas para concretagem. Para a moldagem utilizaram-se formas de madeira disponibilizadas pelo Laboratório de Análises Tecnológicas dos Materiais do UNIPAM. As formas possuem altura de 12 centímetros, largura de 7,5 centímetros e comprimento de 90 centímetros

Foram concretadas 12 vigas. O concreto utilizado para a concretagem das vigas foi o concreto usinado, dosado em central, e o fck estimado foi de 25 MPa. Utilizou-se o concreto autoadensável pelo fato de as vigas terem apenas 7,5 cm de largura, o que evita que elas apresentem espaços vazios decorridos de um ruim adensamento gerado pelo pequeno espaço entre a forma e a armadura. O concreto autoadensável, por sua vez, molda-se preenchendo todos os espaços da forma, não sendo necessária a vibração. As vigas foram identificadas de acordo com a quantidade de estribos que compunham sua armadura, como se vê na Figura 1.

FIGURA 1. Vigas concretadas e identificadas de acordo com a armadura



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Por meio da Figura 1, observa-se que as três vigas compostas de armadura completa estão identificadas, e em razão disso, sabe-se que as nove vigas restantes são compostas com armadura insuficiente.

Dentre as 12 vigas, seis delas são vigas-modelo. Essas vigas não tiveram algum tipo de reforço estrutural. Três vigas compostas com armadura completa, comprovando a veracidade dos cálculos, e três vigas com armadura insuficiente que serviram para um comparativo. Neste comparativo observou-se como uma viga de concreto armado simples se comporta aos esforços solicitantes e como uma viga de concreto armado submetida a reforço estrutural com laminado de carbono se comporta nessa mesma situação.

Simultaneamente à concretagem das vigas de concreto armado, foram concretados quatro corpos de prova, verificando-se se o f_{ck} estimado atendeu ao esperado. Os corpos de prova cilíndrico foram moldados de acordo com a norma regulamentadora ABNT NBR 5738:2015.

Passadas 24 horas da concretagem, as vigas de concreto armado e os corpos de prova passaram pelo procedimento de desforma. Foram finalizadas a desforma e as vigas de concreto armado, e os corpos de prova foram submersos em um tanque com água para o processo de cura.

Após os 28 dias, destinados ao processo de cura, as vigas de concreto armado identificadas para receber o reforço estrutural foram preparadas para a fixação do laminado de carbono. Para esta preparação, foram retiradas as vigas do tanque com água para que elas secassem completamente. Após secagem, as vigas foram lixadas, para regularização de toda superfície que não estava em conformidade, e foram limpas, retirando-se qualquer tipo de partícula solta, para melhor aderência do PRFC, conforme ilustrado na Figura 2.

O PRFC utilizado é da empresa fabricante Sika, do tipo Sika Carbodur S 512. Dentre as propriedades deste produto disponibilizadas pelo fabricante, destacam-se o baixo custo de transporte de material de reforço, a disponibilidade em qualquer comprimento sem necessidade de juntas, a extraordinária resistência à fadiga, a resistência à alcalinidade e a vantagem de não sofrer corrosão, como pode ocorrer com as chapas metálicas.

FIGURA 2: Preparação das vigas para fixação do PRFC



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

O laminado de carbono utilizado possui várias propriedades mecânicas de grande relevância para o bom desempenho do reforço estrutural. Dentre elas, destacam-se a resistência à tração na ruptura e a resistência à temperatura. O laminado de carbono utilizado possuía 11 centímetros de altura e foram espaçados igualmente em 2,5 centímetros, dispostos em 3 placas em cada extremidade. Após preparada a superfície de contato das vigas de concreto armado, fixou-se o laminado de fibras de carbono com adesivo estrutural à base epóxi.

Das vigas identificadas com armadura transversal insuficiente, que foram submetidas ao reforço estrutural, três delas foram reforçadas no ângulo de noventa graus (90°). Outras três vigas, foram reforçadas no ângulo de quarenta e cinco graus (45°), como pode ser observado na Figura 3 e na Figura 4, respectivamente.

FIGURA 3: Reforço estrutural no ângulo de noventa graus (90°)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

FIGURA 4. Reforço estrutural no ângulo de quarenta e cinco graus (45°)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

A diferença de angulação do reforço estrutural possibilitou a verificação de qual posição em que o reforço se encontra apresentou resultado mais satisfatório. Finalizado o reforço estrutural, respeitou-se o tempo de secagem do adesivo epóxi. Após 48 horas, as vigas de concreto armado foram submetidas ao ensaio de flexão, possibilitando a análise da viga ao esforço de cisalhamento.

Na realização deste ensaio, a velocidade de aplicação da carga foi lenta. Foram aplicadas tensões que transmitiram uma força cortante à seção transversal das vigas. Essa força foi elevada progressivamente, até que ocorreu a ruptura das vigas de concreto armado.

Os corpos de prova foram rompidos no ensaio à compressão axial com 28 dias, o que possibilitou a verificação do f_{ck} alcançado pelo concreto após o processo de cura. Este ensaio foi realizado de acordo com as recomendações da ABNT NBR 5739: 2007 e foi feito por meio da Prensa EMIC® DL 20000.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o processo executivo constatou-se que o reforço estrutural com PRFC é prático, pois foi de fácil preparo e aplicação. Ainda, confirmou-se a ressalva de Carneiro (2006), que diz que o sucesso desta técnica pode ser atribuído à alta qualidade dos adesivos epóxis, aliada à sua simplicidade, economia e eficiência de aplicação.

Diante dos ensaios realizados, tornou-se possível fazer a verificação da resistência do concreto alcançada aos 28 dias e a análise do desempenho do laminado de fibras de carbono como reforço estrutural. Foi possível também a realização de um comparativo entre os resultados obtidos pelas vigas-modelo (sem reforço estrutural) e pelas vigas reforçadas em diferentes posições.

Através da equação 1, calculou-se o desvio padrão, que é um parâmetro

estatístico utilizado para apontar a variação de resultados. Para o cálculo, foram empregados os valores médios de resistência obtidos por cada grupo de viga.

$$DP = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{X})^2\right)/(N - 1)} \quad \text{EQUAÇÃO 1}$$

Onde: \bar{X} : média aritmética da série
 n: tamanho da população
 Xi: valor individual
 DP: desvio padrão

O ensaio de compressão axial, conforme ilustrado na Figura 5, nos possibilitou encontrar os valores de resistência à compressão axial aos 28 dias, como pode ser visto no Quadro 2.

FIGURA 5. Ensaio de compressão axial nos corpos de prova



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

QUADRO 2. Resistência a compressão dos corpos de prova aos 28 dias

Corpo de prova	Resistência (MPa)
Corpo de prova 01	33,1
Corpo de prova 02	33,2
Corpo de prova 03	33,7
Corpo de prova 04	33,4
Desvio Padrão	0,26
Média	33,35

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

De acordo com o Quadro 2, observa-se que a resistência para o concreto aos 28 dias teve um valor médio de 33,35 Mpa, e que o desvio padrão foi baixo, o que indica que os valores deste grupo variaram pouco entre si. O f_{ck} estimado era de 25 MPa. Por se tratar de um concreto usinado, tal diferença se deu pela margem de erro que a usina utiliza para garantir que o concreto não apresente uma resistência abaixo do esperado.

Analisaram-se os resultados encontrados no ensaio de flexão das vigas de concreto armado e notou-se que, em conformidade com Ribeiro (2012), os reforços com fibras de carbono nas vigas realmente absorveram as tensões causadas pelos esforços de cisalhamento.

Através do ensaio de flexão nas vigas modelo, que dispunham de armadura completa, observou-se que, conforme esperado, as vigas romperam ao cisalhamento, como pode ser observado na Figura 6.

FIGURA 6. Rompimento da viga modelo ao cisalhamento



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Analisando o desempenho das vigas-modelo, constatou-se que elas atingiram um resultado satisfatório, em que a armadura completa foi solicitada, apresentando uma resistência considerável, como pode ser visto no Quadro 3.

QUADRO 3. Resistência das vigas com armadura completa e sem reforço estrutural

Vigas	Resistência (KN)
Viga 01	38,215
Viga 02	41,065
Desvio Padrão	2,02
Média	39,640

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

De acordo com o Quadro 3, observa-se que o desvio padrão foi de 2,02. Este valor indica que houve uma pequena variação nos valores obtidos.

As vigas com setenta por cento (70%) da armadura transversal e sem reforço estrutural também romperam ao cisalhamento, como mostrado na Figura 7 e na Figura 8.

FIGURA 7. Rompimento da viga modelo com 70% da armadura transversal ao cisalhamento



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

FIGURA 8. Deformação na viga após o rompimento



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

O ensaio de flexão neste grupo de vigas apresentou uma média de 34,093 KN de resistência, como pode ser visto no Quadro 4.

Essa média, como esperado, apresentou um valor de resistência inferior comparando-se com as vigas de armadura completa. Tal fato ocorre porque a armadura transversal também contribui para uma maior resistência da viga. Ainda,

esse grupo de vigas apresentou um maior valor de desvio padrão em relação aos outros grupos de viga. Salienta-se que essa variação se deu devido à baixa resistência da viga 3, que pode ter sido ocasionada por alguma falha na concretagem dessa viga, o que prejudicou seu desempenho.

Quadro 4. Resistência das vigas com setenta por cento (70%) da armadura e sem reforço estrutural

Vigas	Resistência (KN)
Viga 1	36,976
Viga 2	36,550
Viga 3	28,754
Desvio Padrão	4,62
Média	34,093

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Em conformidade com o rompimento das vigas anteriores, as vigas com setenta por cento (70%) da armadura, que foram reforçadas com o laminado de carbono a noventa graus (90°), também se romperam ao cisalhamento, porém houve o desprendimento de algumas placas do laminado de carbono, como ilustrado na Figura 9 e Figura 10.

De acordo com as Figura 9 e 10, observa-se que o laminado de carbono utilizado como reforço estrutural se desprendeu da viga de concreto armado ao ser solicitado pelo esforço cortante. Posteriormente ao desprendimento do laminado de carbono, as vigas se romperam. Tal verificação está em consonância com Ribeiro, Da Silva e Santos (2013), pois o descolamento da camada de reforço pode ter se dado devido ao fato de as tensões de cisalhamento que atuaram na interface concreto-reforço serem superiores à capacidade de aderência da resina epóxi utilizada na colagem.

Figura 9. Desprendimento das placas de laminado de carbono após o rompimento



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

FIGURA 10. Placas de laminado de carbono totalmente desprendidas



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2017

Para a resistência das vigas reforçadas a noventa graus (90°), foram obtidos os valores que podem ser analisados no Quadro 5.

QUADRO 5. Resistência das vigas com setenta por cento (70%) da armadura e com reforço estrutural a noventa graus (90°)

Vigas	Resistência (KN)
Viga 1	39,106
Viga 2	37,998
Viga 3	46,050
Desvio Padrão	4,3
Média	41,051

Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

Conforme observado no Quadro 5, a média obtida para as vigas com este tipo de reforço foi superior à média obtida para as vigas com setenta por cento (70%) da armadura sem reforço estrutural. Ressalta-se que os valores obtidos para as vigas 1 e 2 foram valores próximos que possivelmente não alcançaram uma resistência maior devido ao desprendimento das placas de reforço. Já na viga 3 observa-se que ela atingiu uma maior resistência. Em concordância com Machado (2002), que alerta ser necessário fazer uma limpeza da área garantindo a ausência de qualquer material que prejudique a aderência entre a placa de reforço e a viga, presumiu-se que a alta resistência da viga 3 se deu devido a uma melhor aderência entre o reforço e a superfície de contato da viga. Essa situação influencia no valor do desvio padrão, indicando uma dispersão entre os valores.

Já analisando as vigas reforçadas a quarenta e cinco graus (45°), observa-se que elas romperam ao cisalhamento, contornando o laminado de carbono, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11. Rompimento da viga com reforço a quarenta e cinco graus (45°)



Fonte: Elaborado pelos autores, 2017

O rompimento contornando as placas de reforço deu-se devido à resistência superior do reforço estrutural em relação à viga, de tal forma que a parte da viga que estava sem reforço foi comprometida, causando o seu rompimento. Mediante esse resultado, entende-se que, se o reforço tivesse sido colocado sem espaçamento entre as placas, a resistência teria alcançado maiores resultados. No Quadro 6, observam-se os valores encontrados para a resistência das vigas reforçadas a quarenta e cinco graus (45°).

Quadro 6. Resistência das vigas com setenta por cento (70%) da armadura e com reforço estrutural a quarenta e cinco (45°)

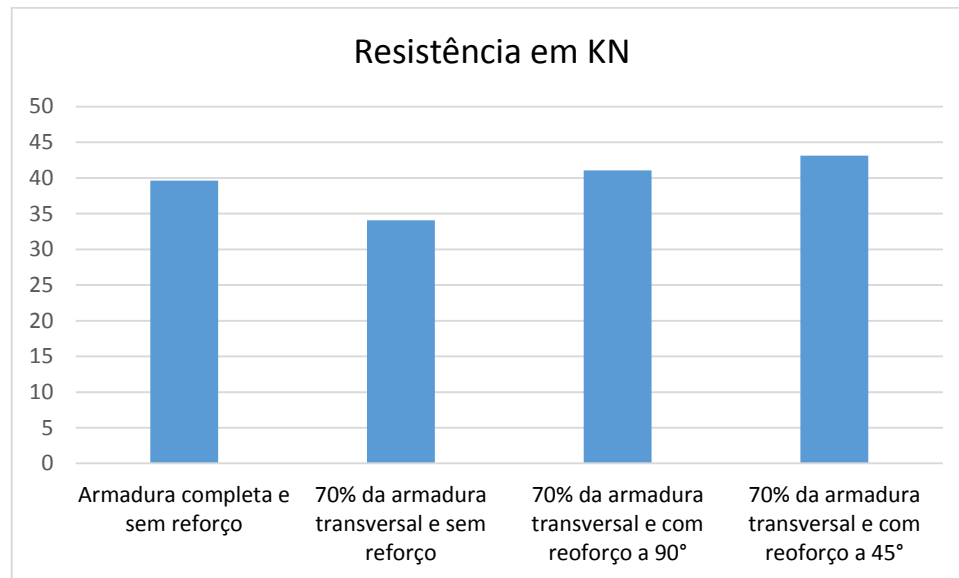
Vigas	Resistência (KN)
Viga 1	44,772
Viga 2	40,086
Viga 3	44,516
Desvio Padrão	2,634
Média	43,124

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2017

De acordo com os resultados, nota-se que o reforço estrutural com o laminado de carbono a quarenta e cinco graus (45°) foi o mais eficiente, pois apresentou uma resistência média superior a todos os outros ensaios. Ainda, nota-se que o desvio padrão encontrado não aponta uma grande dispersão entre os valores.

De posse de todos os resultados, foram dispostos os valores em forma de gráfico para melhor assimilação dos resultados obtidos, como pode ser visto no gráfico 1.

Gráfico 1. Resistência das vigas ensaiadas



Fonte: Elaborado pelos Autores, 2017

Analisando o gráfico 1, torna-se nítida a diferença de resistência que cada grupo de vigas obteve. As vigas com setenta por cento (70%) da armadura transversal reforçadas a quarenta e cinco graus (45°) tiveram a maior resistência, seguidas das vigas com setenta por cento (70%) da armadura transversal e reforçadas a noventa graus (90°). Logo após vieram as vigas com armadura completa e, por último, as vigas com setenta por cento (70%) da armadura transversal e sem reforço. Os resultados atingiram os valores esperados.

5. CONCLUSÃO

Mediante os resultados expostos, pode-se dizer que os objetivos deste trabalho foram alcançados, uma vez que a análise da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado, submetidas a reforço estrutural com Polímero Reforçado com Fibras de Carbono, foi satisfatória. Analisou-se também que o reforço posicionado a quarenta e cinco graus (45°) foi mais eficiente que na posição de noventa graus (90°), já que não houve o desprendimento de placas resultando em uma maior resistência. Ainda, conclui-se que a utilização do laminado de fibras de carbono como reforço ao cisalhamento é viável e prática, dado que o processo executivo é feito de forma simples, rápida e repercute em bons resultados.

Ressalta-se que, em todos os ensaios realizados nas vigas de concreto armado que foram submetidas ao reforço estrutural com o laminado de carbono, as vigas se romperam ou contornando o reforço estrutural, ou com o descolamento das placas. Diante disso, verifica-se que as placas de laminado de carbono não foram danificadas, e que, portanto, não foram solicitadas ao seu limite.

Dessa forma, sugere-se para a continuação desta pesquisa a utilização do reforço estrutural com laminado de carbono sem espaçamento entre as placas, evitando-se assim que os esforços solicitantes contornem o reforço e verificando-se o aumento da resistência neste caso. Sugere-se ainda que sejam moldadas vigas utilizando-se apenas cinquenta por cento (50%) da armadura transversal, para evidenciar a eficiência do reforço em vigas com um déficit de armadura transversal ainda maior.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenadoria de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão do Centro Universitário de Patos de Minas (UNIPAM) pelo incentivo no desenvolvimento da pesquisa e ao Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais de Construção da mesma instituição pelo auxílio durante a realização dos ensaios experimentais

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. G. M. *Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos*. 2001. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2001.

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

_____. *NBR 5738: Concreto-procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova*. Rio de Janeiro. 2003.

_____. *NBR 5739: Concreto-Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Rio de Janeiro. 2007.

AZEVEDO, M. T. "Patologia das estruturas de concreto", in: ISAIA, G. C. (ed.). *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011, v. 2, p. 1095-1128.

BEBER, A. J. *Comportamento Estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com com-*

pósitos de fibras de carbono. 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

CALLISTER, William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CARNEIRO, R. J. F. M. *Análise de vigas protendidas de pontes reforçadas à flexão com polímeros estruturados com fibras de carbono submetidas a carregamentos estático e cíclico*. 2006. 360 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

FURLAN, J. R. S. *Vigas de concreto com taxas reduzidas de armadura de cisalhamento: influência do emprego de fibras curtas e de protensão*. 1995. 373 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 1995.

HABITZREUTER, L; ROSS, H. L. S.; SANTOS, G. M. S. *Análise da eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono em pilares curtos*. 2013. 62. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

MACHADO, A. P. *Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono*. São Paulo: Viapol, 2002. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acesso em: 21 de abr. de 2017.

OLIVEIRA, D. F. *Levantamento de causas de patologias na construção civil*. 2013. 107 f. Projeto (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

REIS, L. S. N. *Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado*. 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

RIBEIRO, T. A. S. *Análise da ligação com filme termo-ativado ou formulação epóxi do reforço à flexão de PRFC em vigas de concreto armado com variação de temperatura utilizando confiabilidade estrutural*. 2012. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2012.

RIBEIRO, T. A. S.; DA SILVA, T. J.; SANTOS, A. C. *Descolamento de reforço de PRFC aderido por formulação epóxi e filme termo-ativo fenólico em vigas de concreto armado*. 2013. 16 f. Instituto Brasileiro de Concreto. 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/305720560_descolamento_de_reforco_de_prfc_aderido_por_formulao_epoxi_e_filme_termo-ativo_fenolico_em_vigas_de_concreto_armado>. Acesso em: 21 de jan. de 2017.

ROMERO, D. V. S. *Reforço à flexão de vigas de concreto armado por meio de protensão externa*. 106 p. Tese (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, E. W. F. *Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial*. 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

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

TIMERMAN, Julio. “Reabilitação e reforço de estruturas de concreto”, in: *Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 2.

ZUCCHI, F. L. *Técnicas para o reforço de elementos estruturais*. 2015. 50 f. Projeto (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.