

Análise experimental de vigas de concreto armado reforçadas com adição de barras de aço e adesivo epóxi

Antonio Caio Andrade Damasceno Cavalcante¹; Carla Simone de Albuquerque²; Ricardo José Carvalho Silva³

RESUMO

O presente trabalho experimental investigou o comportamento estrutural de doze vigas de concreto armado reforçadas à flexão, com adição de barras de aço e adesivo epóxi (tipo encamisamento), realizados de três maneiras diferentes para obtenção de resultados que comprovem o melhor método de inserção e fixação das barras de aço nas vigas. Nos Ensaios do Reforço 1, foram analisadas quatro vigas reforçadas com a adição de um dente externo de adesivo epóxi e armadura longitudinal. Nos Ensaios do Reforço 2 mais quatro vigas foram reforçadas com a inserção de um dente interno de adesivo epóxi e armadura longitudinal. E nos Ensaios do Reforço 3, além do uso do dente externo em mais quatro vigas, também foram utilizados uns grampos com intuito de melhorar a ancoragem do dente de adesivo epóxi na viga de concreto armado. Por fim concluiu-se que as vigas do Ensaio 3, em que o reforço foi somente colado, foram as que apresentaram os melhores resultados.

Palavras-chave: Vigas, Concreto Armado, Estrutura, Reforço

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reforçar e/ou recuperar certas estruturas pode ser causada por diversos fatores como a mudança do uso da estrutura, a inviabilidade de demolição e reconstrução, ou ainda com a necessidade de ampliação da estrutura. Nos últimos tempos, tem-se observado uma grande preocupação com aspectos relacionados a durabilidade, a manutenção das obras civis e a adequação das edificações a novos usos. Isso

1 Engenheiro Civil, pesquisador do Grupo em Estruturas e Materiais (GEM) da Universidade Estadual Vale do Acaraú - UVA. Campus Cidao. Av. Dr. Guarany, 317, Bairro Derby, Sobral – CE – Brasil, CEP: 62.042-030. E-mail: caio_andradecavalcante@hotmail.com

2 Engenheira Civil, pesquisadora do Grupo em Estruturas e Materiais (GEM) da Universidade Estadual Vale do Acaraú - UVA. Campus Cidao. Av. Dr. Guarany, 317, Bairro Derby, Sobral – CE – Brasil, CEP: 62.042-030. E-mail: carla19matematica@gmail.com

3 Professor Doutor do curso de Engenharia Civil, líder do Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais (GEM) da Universidade Estadual Vale do Acaraú - UVA. Campus Cidao. Av. Dr. Guarany, 317, Bairro Derby, Sobral – CE – Brasil, CEP: 62.042-030. E-mail: ricardo.carvalho222@gmail.com

<http://dx.doi.org/10535/rsae.v15i2.7686>

tem estimulado o desenvolvimento de técnicas destinadas a solucionar problemas em peças deterioradas, danificadas ou tornadas obsoletas.

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 de tais fenômenos e os meios empregados na reparação destas estruturas, segundo 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 recuperar e reforçar estruturas de concreto.

Existem vários tipos de reforço no mercado, no entanto cabe ao engenheiro a escolha da técnica mais adequada. Carneiro (2006) destaca que se deve levar em conta, entre outros fatores, a concepção original da estrutura, integridade estética, disponibilidade de mão de obra e de materiais, custo de aplicação, facilidade e rapidez na instalação, desempenho e durabilidade. Dentre estas técnicas pode-se citar a adição de barras de aço, a aplicação de chapas (ou perfis) metálicos e a colagem com fibra de carbono. A mais usada no Brasil, possuindo também um custo bem inferior quando comparada às demais, ainda é a da adição de barras de aço (tipo encamisamento). Esse detalhe motivou o estudo sobre esse tipo de reforço.

Dessa forma, o objetivo dessa pesquisa foi investigar experimentalmente a eficiência de vigas de concreto armado reforçadas com adição de barras de aço e adesivo epóxi através da comparação entre três diferentes tipos de execução (Reforço 1, Reforço 2 e Reforço 3) e, assim, analisar qual método se mostra mais eficiente quanto a aderência substrato/reforço.

A popularidade desse tipo de reforço e seu baixo custo, juntamente com os problemas estruturais encontrados nessa pesquisa, deram boa relevância a essa publicação.

2. REFORÇO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

De acordo com Albuquerque e Silva (2014), os reforços estruturais são necessários para corrigir patologias que podem aparecer com o tempo.

Estruturas de concreto, 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 (Clímaco, 1995). A norma brasileira NBR 6118 (2014) estabelece, como exigências de durabilidade para que esta vida útil seja alcançada, 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, sem exigir medidas extras de manutenção e reparo.

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 o foco principal desse trabalho. Segundo Rodrigues (2017) dentre as principais vantagens desse método de reabilitação destacam-se: maior conhecimento dos materiais empregados (concreto e aço); domínio e conhecimento da execução; custo mais baixo em geral, comparando-se a outros métodos.

Para auxiliar na fixação do reforço utiliza-se o adesivo estrutural de base epóxi, onde de acordo com Duarte (2011), as resinas epóxidas consistem em copolímeros que são formados através da mistura entre um polímero epóxido e um agente catalizador (ou endurecedor), que reagem de forma a obter produtos, com uma elevada resistência mecânica, aderência e resistência química proporcionando uma excelente aderência do reforço ao concreto. Como destaca Escobar (2003), a função principal do adesivo é garantir a aderência do aço com o concreto, estabelecendo assim a integridade do conjunto reforço/epóxi/concreto.

Moraes (2009) acrescenta ainda algumas vantagens observadas na aplicação desse tipo de intervenção com o adesivo estrutural de base epóxi: resistência à corrosão (pela resina ser insensível à umidade), aderência a diferentes tipos de substrato, cura rápida, elevada resistência mecânica, além de ser resistente à retração durante seu endurecimento, elevado desempenho mecânico, flexibilidade do sistema construtivo e a solução consideravelmente leve, de fácil aplicação junto ao elemento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para cada série de vigas foram concretados 6 corpos de prova cilíndricos. Para determinação da resistência à compressão do concreto (f_c) foram realizados ensaios de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos, de acordo com as recomendações da NBR 5739 (2007), e para tração (f_t) foram realizados ensaios por compressão diametral, conforme as recomendações da NBR7222 (2011). Os valores estão apresentados na Tabela 1.

Os ensaios das vigas foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção do Departamento de Engenharia da Universidade Estadual Vale do Acaraú pelo grupo de pesquisa GEM (Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais). Foi utilizado uma prensa adaptada com uma bandeja metálica existente, com dois apoios flexíveis distantes 62 cm entre si, e um dispositivo para distribuição de carga em dois pontos simétricos.

O Ensaio de Stuttgart, também conhecido como Ensaio de Quatro Pontos, foi o método usado para todas as vigas. Esse tipo de ensaio tem a vantagem de permitir, numa mesma peça, a observação do trecho em flexão pura, no trecho BC e do trecho em flexão simples nos trechos AB e CD (Figura 1).

Tabela 1 – Resistência do concreto utilizado em cada ensaio

Corpos de Prova do Ensaio do Reforço 1							
CP's	P (kN)	f _c (MPa)	f _c , médio (MPa)	CP's	P (kN)	f _t (MPa)	f _t , médio (MPa)
CP1	196,13	24,97	24,89	CP1	176,52	5,62	5,49
CP2	194,17	24,72		CP2	166,71	5,31	
CP3	196,13	24,97		CP3	174,56	5,56	
Corpos de Prova do Ensaio do Reforço 2							
CP's	P (kN)	f _c (MPa)	f _c , médio (MPa)	CP's	P (kN)	f _t (MPa)	f _t , médio (MPa)
CP1	180	22,92	23,78	CP1	90	2,86	2,97
CP2	190	24,20		CP2	90	2,86	
CP3	190	24,20		CP3	100	3,18	
Corpos de Prova do Ensaio do Reforço 3							
CP's	P (kN)	f _c (MPa)	f _c , médio (MPa)	CP's	P (kN)	f _t (MPa)	f _t , médio (MPa)
CP1	288	36,69	31,46	CP1	122	3,10	3,15
CP2	193	24,58		CP2	130	3,31	
CP3	260	33,12		CP3	118	3,04	

As três séries de ensaios (Ensaio do Reforço 1, Ensaio do Reforço 2 e Ensaio do Reforço 3), apresentadas nos itens a seguir, descrevem os ensaios das vigas reforçadas em três etapas: (a) Pré-fissuramento, (b) Reforço e (c) Ensaio. Para as vigas de referência, somente a etapa do Ensaio foi realizado.

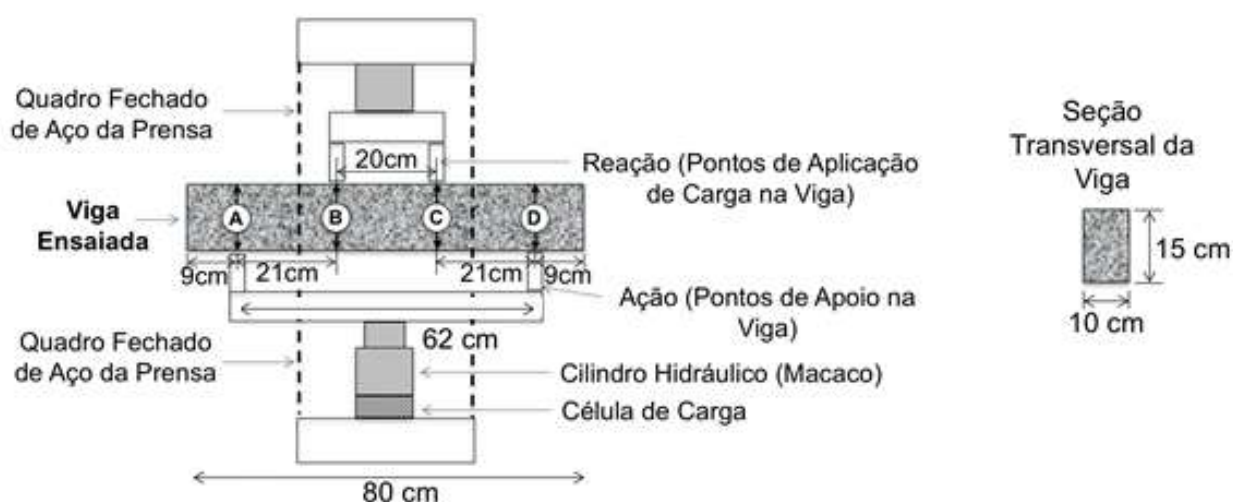


Figura 1 - Ensaio de Stuttgart.

Na realização desse estudo, o Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais (GEM), da Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA), produziu cinco vigas de concreto armado para cada um dos três ensaios apresentado nesta pesquisa, das quais, quatro receberam reforço e uma viga não recebeu nenhum tipo de reforço (viga de referência). Todas as vigas foram produzidas com as mesmas dimensões: 80 cm de comprimento (sendo 62 cm o trecho bi-apoiado), 15 cm de altura e 10 cm de largura como apresentado na Figura 1.

Apesar das quinze vigas ensaiadas (três não reforçadas e doze reforçadas) terem dimensões reduzidas, nesse estudo não foi feita uma correlação com um protótipo de dimensões reais através da análise quantitativa via análise dimensional e leis da similaridade. O objetivo desse estudo sempre foi fazer uma análise qualitativa, comparando-se os resultados das vigas reforçadas com as vigas não reforçadas (vigas de referência).

3.1. Ensaios do Reforço 1 – Reforço com dente externo

Das cinco vigas ensaiadas, a viga de referência foi denominada viga L1 e as vigas reforçadas foram denominadas vigas L2, L3, L4 e L5. Os dados e resultados desses ensaios foram apresentados na Tabela 2. Na primeira etapa dos ensaios, as quatro vigas que seriam reforçadas foram devidamente posicionadas na prensa hidráulica para serem submetidas a um pré-fissuramento, aplicou-se carga progressivamente até atingir o valor de 50 kN, (aproximadamente 70% da carga de ruptura estimada da viga) e, em seguida, houve a etapa do reforço da viga.

O reforço das vigas consistiu na adição de uma barra de aço de 47 cm de comprimento e adesivo estrutural de base epóxi sikadur 31. Com o adesivo epóxi, foi preenchida uma área de 2 x 2 cm (dente) e um comprimento de 50 cm, onde logo após foi adicionada nesta área a barra de aço, que foi centralizada a 15 cm das extremidades e a 4 cm das laterais. A diferença entre as quatro vigas reforçadas está no diâmetro da barra de aço adotada que foi de 8mm para viga L2, de 10mm para viga L3, de 12,5mm para viga L4 e de 16mm para viga L5 (Figura 2).

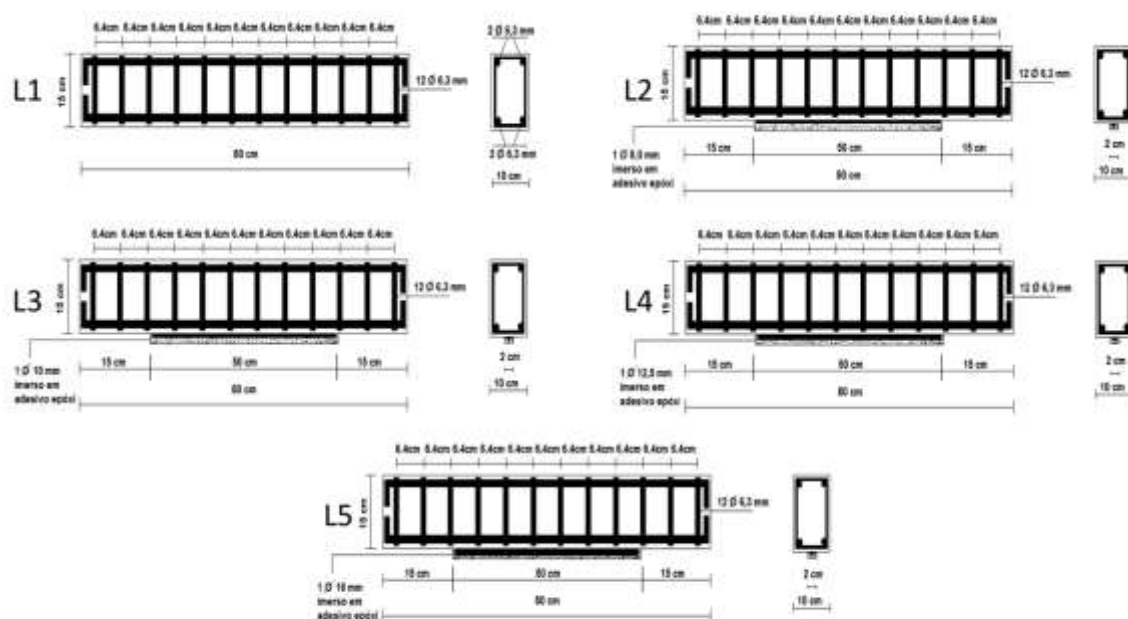


Figura 2 - Detalhamento das armaduras e do reforço das vigas L1, L2, L3, L4 e L5.

Tabela 2 – Características das vigas do ensaio

Vigas	$f_c^{(1)}$ (MPa)	Reforço (mm)	Armadura longitudinal (mm)	Armadura transversal (mm)	Carga de Ruptura (kN)	Modo de ruptura
L1	24,89	Sem reforço	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	65	F
L2	24,89	1 Φ 8,0	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	75	F
L3	24,89	1 Φ 10,0	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	60	F
L4	24,89	1 Φ 12,5	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	68	F
L5	24,89	1 Φ 16,0	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	70	F

F – Flexão;

CTD – Cisalhamento por Tração Diagonal;

CCD – Cisalhamento por Compressão Diagonal;

⁽¹⁾ f_c = Resistência média à compressão do corpo de prova no dia do ensaio segundo NBR5739 (2007).

Na etapa do reforço, inicialmente as vigas foram limpas na face inferior para receber o reforço, pois estas deveria estar livre de impurezas para ocorrer uma melhor aderência entre reforço e substrato. Em seguida, as vigas receberam a demarcação da posição das barras de aço, de maneira centralizada e equidistante dos extremos da viga (Figura 3).



Figura 3 – Vigas reforçadas e viga de referência

Finalmente, na última etapa, 6 dias depois do reforço, todas as cinco vigas foram ensaiadas até a ruptura (Figura 4).



Figura 4 - Vigas L1, L2, L3, L4 e L5 após ruptura.

3.2. Ensaios do Reforço 2 - Reforço com dente interno

Nessa nova série de ensaios, a viga de referência foi denominada viga V1 e as vigas reforçadas foram denominadas vigas V2, V3, V4 e V5. Os dados e resultados desses ensaios estão apresentados na Tabela 3. As etapas desses ensaios foram exatamente iguais às etapas do item anterior. E a única diferença desse tipo de reforço para o anterior é que esse tipo de reforço é dentro de um “rasgo” da viga feito com uma maquina. O ponto negativo desse reforço é que ao se criar esse “rasgo” na viga, os estribos acabam sendo cortados também.

O reforço dessas vigas consistiu na adição de uma barra de aço de 47 cm de comprimento e adesivo estrutural de base epóxi sikadur 31 dentro dos “rasgos” na parte inferior das vigas. Com o adesivo epóxi foi preenchida uma área de 2 x 2 cm (dente) e um comprimento de 50 cm, onde logo após foi adicionada nesta área a barra de aço, que foi centralizada a 15 cm das extremidades e a 4 cm das laterais. A diferença entre as quatro vigas reforçadas está no diâmetro da barra de aço adotada que foi de 8mm para viga V2, de 10mm para viga V3, de 12,5mm para viga V4 e de 6,3mm para viga V5, conforme detalhamentos da Figura 5 e da Figura 6.

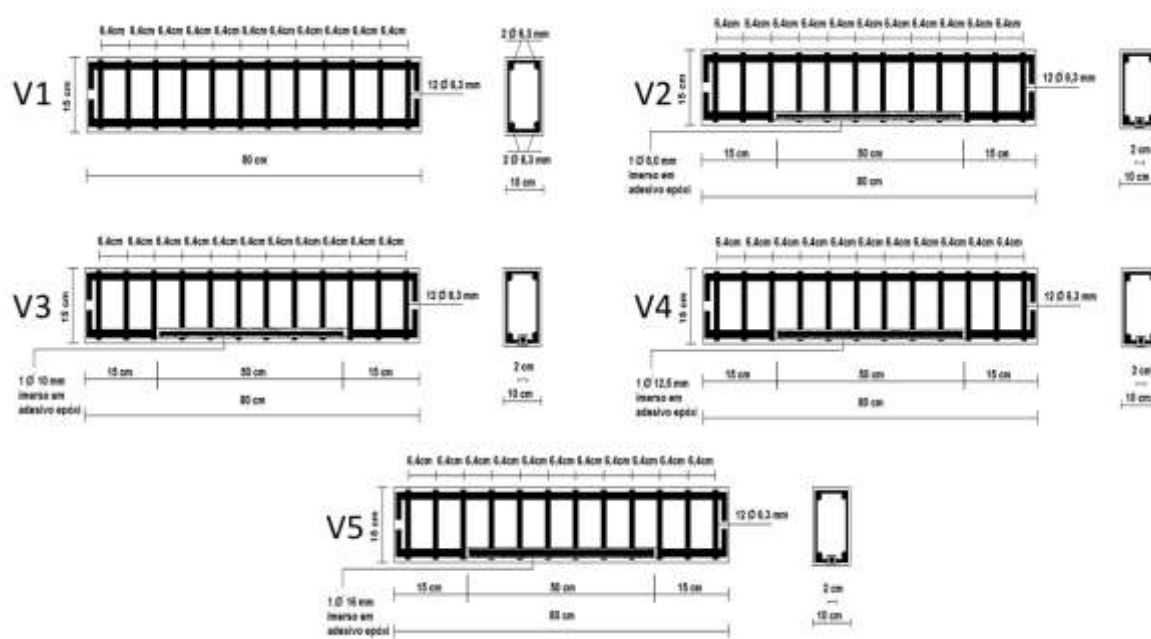


Figura 5 - Detalhamento das armaduras e do reforço das vigas V1, V2, V3, V4 e V5.

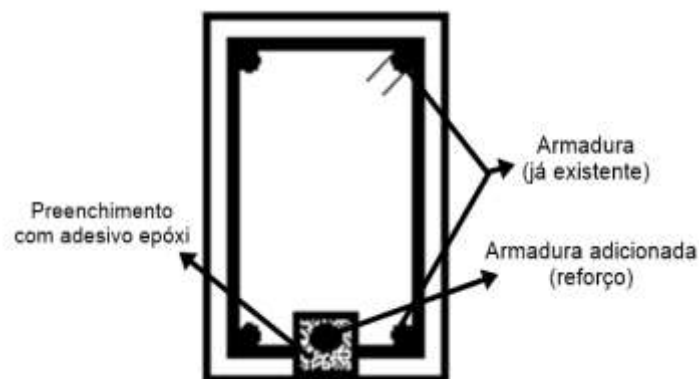


Figura 6 - Detalhamento do reforço inserido nas vigas V2, V3, V4 e V5.

Tabela 3 – Características das vigas do ensaio

Vigas	$f_c^{(1)}$ (MPa)	Reforço (mm)	Armadura longitudinal (mm)	Armadura transversal (mm)	Carga de Ruptura (kN)	Modo de ruptura
V1	23,78	Sem reforço	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	90	F
V2	23,78	1 Φ 8,0	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	70	CTD
V3	23,78	1 Φ 10,0	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	80	CTD
V4	23,78	1 Φ 12,5	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	80	CTD
V5	23,78	1 Φ 6,3	2 Φ 6,3	11 Φ 6,3	70	CTD

F – Flexão;

CTD – Cisalhamento por Tração Diagonal;

CCD – Cisalhamento por Compressão Diagonal;

⁽¹⁾ f_c = Resistência média à compressão do corpo de prova no dia do ensaio segundo NBR5739 (2007).

Por fim, na última etapa, 6 dias após o reforço, todas as cinco vigas foram ensaiadas até a ruptura (Figura 7).



Figura 7 - Vigas V1, V2, V3, V4 e V5 após ruptura.

3.3 Ensaios do Reforço 3 - Reforço com dente externo com/sem grampo

Nesses ensaios, a viga de referência foi denominada viga E1 e as vigas reforçadas foram denominadas vigas E2, E3, E4 e E5. Os dados e resultados desses ensaios são mostrados na Tabela 4. As etapas desses ensaios foram exatamente iguais às etapas dos dois itens anteriores. A diferença desse tipo de reforço em relação ao primeiro é que nesse em duas vigas há grampos em formato de “U” com intuito em melhorar a ancoragem. Outra diferença é que os comprimentos dos reforços da E2 e E3 diferem dos reforços da E4 e E5.

A viga E1 teve como armadura longitudinal 2 barras com 6,3 mm de diâmetro e como armadura transversal 12 estribos com 6,3 mm de diâmetro. A armadura da viga E1 foi repetida para as demais vigas reforçadas e atende aos critérios de armadura mínima requisitados pela NBR 6118 (2014).

Os reforços das vigas E2 e E3 foram feitos através da adição de 2 barras de aço de 50 cm de comprimento e diâmetro de 6,3 mm, fixadas com o adesivo estrutural de base epóxi, já os reforços das vigas E4 e E5 foram feitos através da adição de 2 barras de aço de 30 cm de comprimento, mas com o mesmo diâmetro de 6,3 mm e também fixadas com o adesivo estrutural de base epóxi, como mostrado na Figura 8. Nas vigas E3 e E5 foram inseridos grampos para melhorar a ancoragem das barras de reforço ao substrato da viga, onde foram inseridos sete grampos em formato de “U” de 7 cm de altura e 4,5 cm de largura, que penetram 5,5 cm dentro da viga, assim como é apresentado na Figura 9.

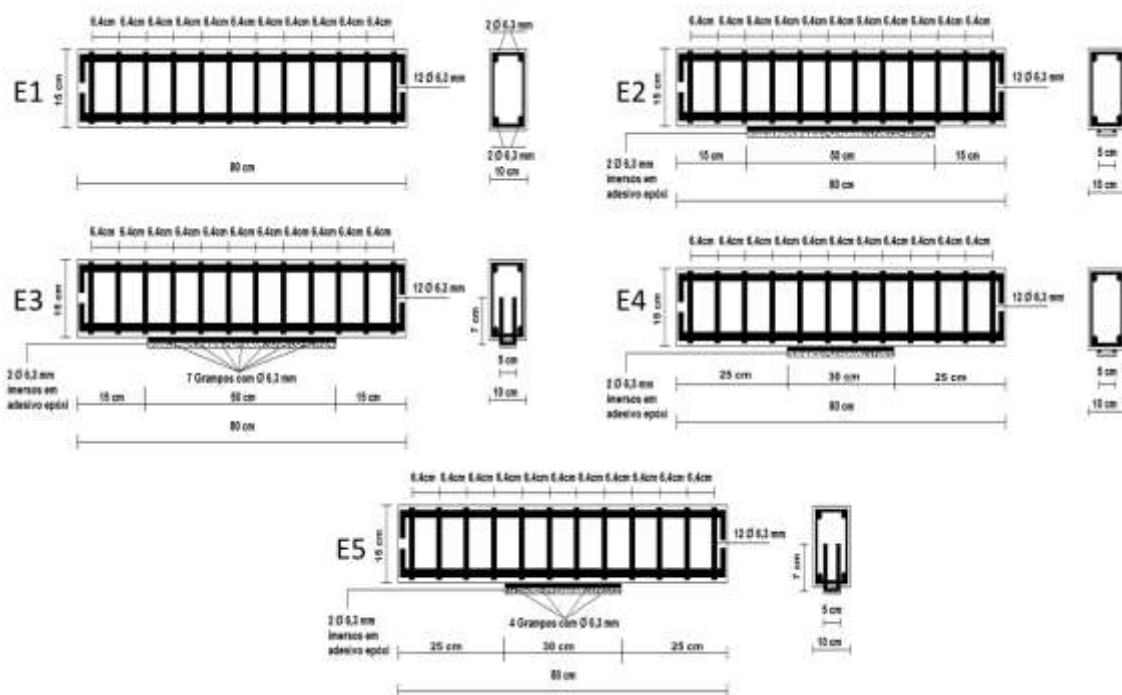
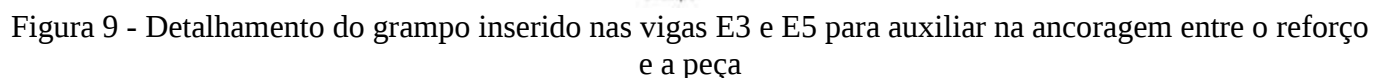


Figura 8 - Detalhamento das armaduras e do reforço das vigas E1, E2, E3, E4 e E5.



Vigas	$f_c^{(1)}$ (MPa)	Reforço (mm)	Comprimento do reforço (cm)	Grampos em formato “U” (mm)	Carga de Ruptura (kN)	Modo de ruptura
E1	31,46	Sem reforço	Sem reforço	Sem grampos	80	F
E2	31,46	2 Φ 6,3	50	Sem grampos	108	F
E3	31,46	2 Φ 6,3	50	7 “U” Φ 6,3	96	CCD
E4	31,46	2 Φ 6,3	30	Sem grampos	116	F
E5	31,46	2 Φ 6,3	30	4 “U” Φ 6,3	74	F

(1) f_c = Resistência média à compressão do corpo de prova no dia do ensaio segundo NBR5739 (2007).

OBS2: Todas as vigas tinham 12 estribos de Φ 6,3 mm.



The image shows four concrete beams arranged horizontally. From left to right, the first and third beams are reinforced with spiral reinforcement, while the second and fourth beams are reinforced with cross reinforcement. The beams are resting on a light-colored surface.

28

O adesivo epóxi foi aplicado após terem sido feitas os “rasgos” nas vigas (Figura 11).



Figura 11 - Vigas reforçadas

Na última etapa, 6 dias após o reforço, todas as cinco vigas foram ensaiadas até a ruptura (Figura 12).



Figura 12 - Vigas E1, E2, E3, E4 e E5 após ruptura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das vigas ensaiadas estão expressos na Figura 13. Nessa figura foi construído um gráfico onde o eixo das abcissas é representado pela taxa de armadura da viga, ou seja, é a área de aço (armadura de flexão + armadura de reforço a flexão) dividido pela área da seção transversal da viga. E o eixo das coordenadas é representado pela carga de ruptura experimental da viga analisada dividido pela carga experimental da viga de referência daquele ensaio. Os pontos expressos no gráfico que ficaram acima da linha de referência são considerados reforços eficientes. Os que ficaram abaixo são reforços ineficientes.

A primeira observação que se percebe nesse gráfico é que a eficiência dos reforços não cresce nem decresce com o aumento da taxa de armadura. Isso pode ser justificado porque a aderência entre o adesivo epóxi e o concreto apresentou problemas em muitos ensaios. Especialmente nas vigas do ensaio 1 (Reforço 1) com dentes externos. Além disso, o tipo de reforço do ensaio 2 (Reforço 2) reduziu a resistência ao cisalhamento das vigas. Isso ocorreu por conta da necessidade em se cortar parte dos estribos para a colocação do reforço embutido nas vigas (dente interno).

No ensaio 1 (vigas reforçadas com dente externo) houve o descolamento do reforço em todas as vigas na proximidade da carga de ruptura, não propiciando aumento de carga proporcional ao aumento de taxa de armadura. Inclusive, na viga L3 o descolamento foi precoce e a viga rompeu com carga inferior a viga de referência L1 (sem reforço). Apesar das vigas L2, L4 e L5 estarem um pouco acima da linha de referência do gráfico, não se pode considerar como um bom resultado de maneira geral. Dessa maneira, pode-se entender que as vigas do ensaio 1 não apresentaram um reforço eficiente por conta da aderência entre o dente externo de adesivo epóxi e a viga de concreto armado.

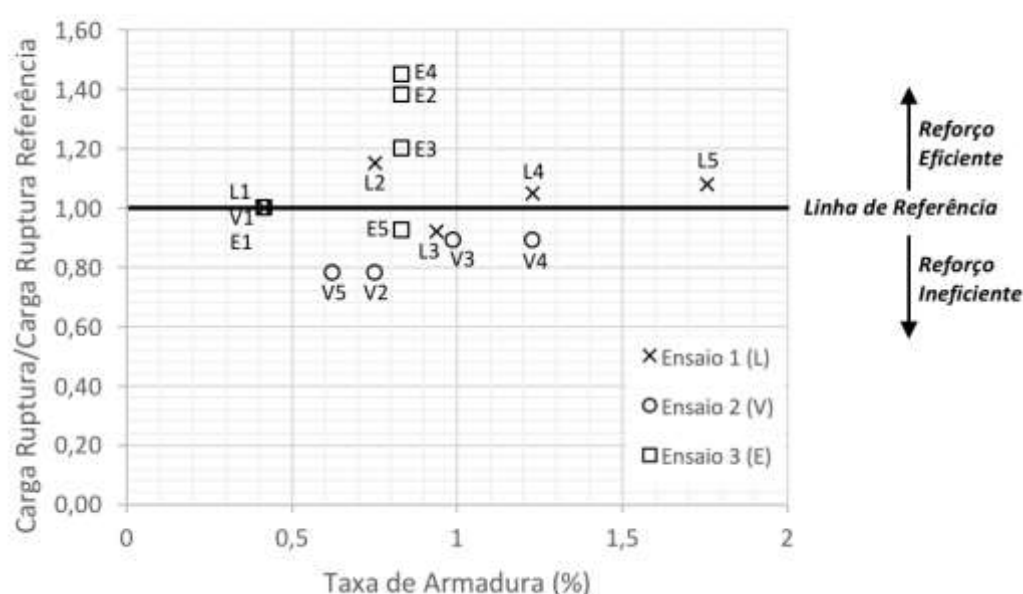


Figura 13 – Gráfico da relação taxa de armadura com ganho de carga

No ensaio 2 (vigas reforçadas com dente interno) esperava-se que o problema do descolamento do reforço (dente) fosse resolvido. E realmente foi. Não houve descolamento do reforço. O problema é que, para colocar esse reforço interno, foi necessário criar um “rasgo” no fundo da viga. E dessa maneira, é praticamente impossível fazer esse “rasgo” sem cortar a parte inferior dos estribos. Esse corte reduziu a ancoragem dos estribos e, conseqüentemente, também reduziu a resistência ao cisalhamento dessas vigas. Assim, entende-se que esse foi o pior de todos os reforços aqui analisados. Todas as vigas reforçadas romperam por cisalhamento com carga inferior ao da viga de referência (V1). Em outras palavras, pode-se dizer que esse reforço à flexão reduz a resistência ao cisalhamento.

No ensaio 3 (Reforço 3) (vigas reforçadas com dente externo com/sem grampo) verificou-se uma melhor aderência entre o reforço externo e a viga de concreto armado. Houve o descolamento parcial do reforço na ruptura das vigas, mas não houve o descolamento completo como aconteceu nas vigas do ensaio 1. A grande diferença foi que nas vigas do ensaio 3 foram feitas grandes ranhuras afim de a superfície ficasse bem mais áspera que nas vigas do ensaio 1. Isso melhorou bastante a aderência. Outra observação é que as vigas com grampos (E3 e E5) obtiveram menor resistência que as vigas só coladas sem grampos (E2 e E4). O fato é que os grampos que estavam auxiliando na ancoragem dos reforços concentravam muita tensão naquela região. No caso da viga E3, essa concentração de tensão ocorreu na região da biela comprimida, próximo ao apoio, causando uma ruptura por cisalhamento com esmagamento da biela comprimida. E comparando os bons resultados da viga E2 (comprimento do reforço curto) com da viga E4 (comprimento do reforço longo), verificou-se que o reforço curto da viga E4 se mostrou mais eficiente. Esse fato se justifica por conta da viga E4 se ancorar em região de flexão pura, sem influência do cisalhamento que provoca o arrancamento do reforço. Assim, pode-se entender que o reforço sem grampos das vigas do ensaio 3 (E2 e E4) foram os mais eficientes dentre todos aqui analisados.

5. CONCLUSÕES

O Reforço 1 se mostrou, de maneira geral, ineficiente. Embora seja muito parecido com o Reforço 3 sem grampo, no Reforço 1, as ranhuras feitas no fundo das vigas foram suaves e, por isso, não forneceram boa aderência para o reforço. Todas as vigas dessa série tiveram descolamento do reforço completo antes da ruptura.

O Reforço 2 foi o pior de todos. Apesar de o reforço interno na viga não ter descolado, a maneira como foi inserido o reforço, cortando os estribos, levaram todas as vigas dessa série a romper por tração diagonal com carga inferior à viga de referência não reforçada.

O Reforço 3 foi o que apresentou melhores resultados. No caso dos reforços só colados, os resultados foram muito bons. As ranhuras feitas mais profundas que as feitas para o Reforço 1 deram boa aderência ao reforço. Especialmente a viga colada de tamanho mais curto (E4) apresentou um aumento de resistência

considerável em relação a viga de referência (E1). Por outro lado, as vigas com grampos em “U” tiveram menor ganho de carga. Inclusive, a viga com reforço mais longo com grampo (E5) rompeu por compressão diagonal com carga inferior à da viga de referência sem reforço (E1).

Nesses ensaios não foram usados os LVDT's para medir os deslocamentos verticais e obter mais dados sobre ductilidade, por falta de espaço na prensa, com isso a pesquisa ficou restrita apenas aos resultados de capacidade de carga. Vale salientar que as conclusões obtidas estão restritas apenas aos resultados dos ensaios das vigas aqui apresentados e que mais ensaios são necessários para continuar essa investigação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque, C.S. e Silva, R. J. C. (2014). Estudo teórico de reforço de vigas de concreto armado. Revista Essentia, Sobral, vol. 16, nº 1, p. 241-262.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. ABNT: Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). NBR 5739:2007 - Concreto - Ensaio de compressão axial de corpos-de-prova cilíndricos. ABNT: Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). NBR 7222:2011 - Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. ABNT: Rio de Janeiro.

Rodrigues, R. M. (2017). Reabilitação estrutural em concreto armado. São Paulo: Unilins, 2017.

Cánovas, M.F.(1988). Patologia e Terapia do Concreto Armado. Ed. Pini. São Paulo.

Escobar, C. J. (2003). Avaliação do desempenho estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com lâmina de CFRP tensionada. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

Carneiro, R. J. F. M. (2006). Análise de vigas protendidas de pontes reforçadas à flexão com polímeros estruturados com fibras de carbono submetidas a carregamento estático e cíclico. Tese de doutorado, Universidade de Brasília. Brasília.

Moraes, C. A. Intervenções metálicas em construções preexistentes: estudo de caso de interfaces. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

Clímaco, J.C.T. (1995). Reforço à flexão de vigas de concreto armado envolvendo a adição de concreto novo. In: XXVII Jornadas Sudamericanas de Ingenieria Estructural. Tucumán, Argentina, setembro.

Duarte, P. C. F. S. (2011). Estudo experimental do efeito da reparação de fendas no comportamento de vigas de betão armado reforçadas a flexão com laminados de CFRP. Dissertação de mestrado. Universidade técnica de Lisboa, Lisboa.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FUNCAP e a Universidade Estadual Vale do Acaraú – UVA e ao Grupo de Pesquisa em Estruturas e Materiais - GEM, pelo apoio financeiro e pela estrutura necessária a essa pesquisa.

Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo, v. 15, n. 2, p. 19-36, mai. /ago. 2018

Experimental Analysis of reinforced concrete beams strengthened with the addition of steel bars and epoxy adhesive (*Corrigir*)

ABSTRACT

This experimental work investigated the structural behavior of twelve reinforced concrete beams strengthened to flexure, with the addition of steel bars and epoxy adhesive (jacketing), performed in three different ways. The tests of Strengthening 1 analyzed four beams strengthened with the addition of an external “tooth” of epoxy adhesive and longitudinal reinforcement. In the tests of Strengthening 2, four more beams were strengthened with the insertion of an internal “tooth” of epoxy adhesive and longitudinal reinforcement. And in the tests of Strengthening 3, besides the use of the external “tooth” in four more beams, some clips were also used with the aim of improving the anchorage of the “tooth” of epoxy adhesive in the reinforced concrete beam.

Keywords: Beams, Reinforced Concrete, Structure, Strengthening.

1. INTRODUCTION

The aim of this research was to experimentally investigate the efficiency of reinforced concrete beams strengthened with the addition of steel bars and epoxy adhesive through the comparison among three different types of execution (Strengthening 1, Strengthening 2 and Strengthening 3).

2. STRENGTHENING IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

According to Albuquerque and Silva (2014), the structural strengthenings are necessary in order to correct pathologies which can appear over time.

3. MATERIALS AND METHODS

The test consisted in the gradual loading of the beam, the concentrated loads are increased each 10 kN until they reach the value that takes the beam to failure, it still has the advantage of allowing, in the same beam, the observation of pure flexure, in the span BC and the simple flexure in the span AB and CD (Figure 1). All beams were produced with the same dimensions: 80 cm length (the bi-supported span is 62 cm), 15 cm height and 10 cm width as shown on Figure 1.

In spite of the fact that the fifteen beams tested (three were not strengthened and twelve were strengthened) have reduced dimensions, this study did not do a correlation with a prototype of real dimensions through the quantitative analysis by dimensional analysis and laws of similarity. The aim of this study has always been to do a qualitative analysis by comparing the results of the strengthened beams to the non-strengthened ones (beams of reference).

3.1. Tests of Strengthening 1 – Strengthening with an external “tooth”

Table 2 presents the data of the five analyzed beams. The strengthening of the beams consisted in the addition of a steel bar of 47 cm length and epoxy adhesive sikadur 31. The epoxy adhesive filled an area of

2 X 2 cm (“tooth”) and 50 cm length, where the steel bar which was centralized 15 cm away from the extremities and 4 cm away from the lateral face, was added. The difference among the four strengthened beams is in the diameter of the steel bar adopted which was 8mm to L2, 10mm to L3, 12,5mm to L4 and 16mm to L5, as it was presented in the detailing of Figure 2 and Figure 3. And Figure 4 shows the tested beams.

3.2. Tests of Strengthening 2 – Strengthening with an internal “tooth”

Table 3 presents the five data of the analyzed beams. The strengthening of the beams consisted in the addition of a steel bar of 47 cm length and epoxy adhesive sikadur 31. The epoxy adhesive filled an area of 2 X 2 cm (“tooth”) and 50 cm length, where the steel bar, which was centralized 15 cm away from the extremities and 4 cm from the lateral face, was added. The difference among the four strengthened beams is in the diameter of the steel bar adopted which was 8mm to V2, 10mm to V3, 12,5mm to V4 and 6,3mm to V5, as it was presented in the detailing of Figure 5 and Figure 6. And Figure 7 shows the tested beams.

3.3 Tests of Strengthening 3 – Strengthening with external tooth with/without clip

Table 4 presents the data of the five tested beams. The strengthening's of beams E2 and E3 were done through the addition of 2 steel bars of 50 cm length and diameter of 6,3 mm, glued with the structural epoxy adhesive, since the strengthening's of beams E4 and E5 were done through the addition of 2 steel bars of 30 cm length, but with the same diameter of 6,3 mm and also glued with the structural epoxy adhesive, as shown on Figure 8. In beams E3 and E5, clips were inserted in order to improve the anchorage of the strengthening bars to the substrate of the beam, where seven “U” shaped clips of 7 cm height and 4,5 cm width were inserted, they penetrated 5,5 cm into the beam, as shown on Figure 9, Figure 10 and Figure 11. And Figure 12 shows the tested beams.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

The first observation in the graph expressed on Figure 13 is that the efficiency of the strengthening's does not increase or decrease with the increase of the rate of reinforcement. It can be justified because the adherence between the epoxy adhesive and the concrete presented problems in many tests. Especially in the beams of test 1 (Strengthening 1) with external “tooth's”. Besides that, the type of strengthening of test 2 (Strengthening 2) reduced the resistance to shear of the beams. It occurred because of the need of cutting part of the stirrups for the insertion of the strengthening into the beams (internal “tooth”).

In test 1, there was the ungluing of the strengthening in all the beams when they were almost reaching the failure load, not propitiating an increase of resistance proportional to the increase of rate of reinforcement. In beam L3, the ungluing was premature and the beam failed with an inferior load to the beam of reference L1 (with no strengthening). In spite of the fact that beams L2, L4 and L5 are a little above the line of reference of the graph, in a general way, it cannot be considered a good result. This way,

it can be understood that the beams of test 1 did not present an efficient strengthening because of the adherence between the external “tooth” of epoxy adhesive and the reinforced concrete beam.

In test 2, it was expected that the problem of the ungluing of the strengthening (“tooth”) was solved. And it really was. There was no ungluing of the strengthening. The problem is that, in order to put this internal strengthening, it was necessary to create a “tear” in the bottom of the beam. This way, it is practically impossible to make this “tear” without cutting the inferior part of the stirrups. This cut reduced the anchorage of the stirrups and, consequently, it also reduced the resistance to shear of these beams. Thus, it is understood that it was the worst of all the strengthening’s analyzed here. All the strengthened beams failed due to shear with an inferior load to the beam of reference (V1). In other words, it can be said that this strengthening to flexure reduces the resistance to shear.

In test 3 (Strengthening 3) it was verified a better adherence between the external strengthening and the reinforced concrete beam. There was the partial ungluing of the strengthening in the failure of the beams, but there was not the complete ungluing as it happened to the beams of the test. The big difference was that in the beams of test 3, big slots were made in order to make the surface become rougher than in the beams of test 1. It improved the adherence. Another observation is that the beams with clips (E3 and E5) obtained less resistance than the beams which were glued without clips (E2 and E4). The fact is that the clips which were helping in anchorage of the strengthening’s concentrated a lot of tension in that region. In the case of beam E3, this concentration of tension occurred in the region of the compressed strut, close to the support, causing a failure by shear with crushing of the compressed strut. By comparing the good results of beam E2 (length of the short strengthening) to the ones of beam E2 (length of the long strengthening), it was verified that the short strengthening of beam E4 has proved to be more efficient. It is justified because of the fact that beam E4 anchors in region of pure flexure, without influence of the shear which causes the ungluing of the strengthening. Thus, it can be understood that the strengthening with no clips of the beams in test 3 (E2 and E4) was the most efficient among all the ones analyzed here.

5. CONCLUSIONS

In a general way, strengthening 1 has proved to be inefficient. Although, it is very similar to Strengthening 3 without clips, in Strengthening 1, the slots made in the bottom of the beams were soft and, because of that, did not provide a good adherence for the strengthening. All the beams of this series had a complete ungluing of the strengthening before the failure.

Strengthening 2 was the worst of all. In spite of the fact that the internal strengthening in the beam did not unglue, the way that the strengthening was inserted, cutting the stirrups, took all the beams of this series to failure by diagonal tensile with an inferior load to the non-strengthened beam of reference.

Strengthening 3 was the one that presented better results. In the case of the strengthening’s which were only glued, the results were very good. The slots which were made deeper than the ones made for the

Strengthening 1 provided a good adherence to the strengthening. Especially the shortest glued beam (E4) presented a considerable increase of resistance in comparison to the beam of reference (E1). On the other hand, the beams with “U” shaped clips, had less ultimate load gain. The beams with longer strengthening with clip (E5) failed by diagonal compression with an inferior load to the one of the beam of reference without strengthening (E1).

It is important to emphasize that the conclusions obtained in this study are restricted only to the results of the tests of the beams presented here. More tests are necessary in order to continue this investigation.