

Experimental study of RC beams strengthened for bending by reinforced grout layer and connectors

Estudo experimental em vigas de CA reforçadas à flexão por encamisamento e conectores



J. H. CANAVAL ^a
junior.canaval@ifmg.edu.br

T. J. DA SILVA ^b
tjdsilva@gmail.com

A. C. SANTOS ^b
acds.pir@gmail.com

Abstract

This work is based on an experimental investigation of reinforced concrete beams strengthened to flexure for wrapping applying a type of metallic connector in the bond substrate/grout. The experimental program consisted of 5 beams used for reference (without strengthening), 5 beams reinforced with surface brushed texture substrate and 5 beams with metal connectors bonded to the substrate. The beams were submitted to four-point load bending test. Initially with a partial loading, executed the strengthening and were finally tested until the break. The strengthening was made up by the increase by grout, on the sides and bottom of the beam and reinforcing. The applied force, the displacement, deformations in steel and in concrete were measured. The reference beams failure by flexing with the calculated charges. The bending strengthening proved efficient, increasing the bearing capacity in 44% and the failure was by shear in the stretch without strengthening. Beams with connectors the increase was higher.

Keywords: reforço estrutural, estruturas de concreto armado, interface concreto-graute, conectores.

Resumo

Este trabalho é relativo a uma investigação experimental sobre reforço à flexão de vigas de concreto armado por encamisamento aplicando-se um tipo de conector metálico na ligação substrato/concreto novo. O programa experimental foi constituído de 5 vigas utilizadas para referência (sem reforço), 5 vigas reforçadas com superfície do substrato de textura escovada e 5 vigas com conectores metálicos colados no substrato. A aplicação de força foi em dois pontos, inicialmente com um carregamento parcial, executou-se o reforço e finalmente foram ensaiadas até a ruptura. O reforço foi composto pelo acréscimo parcial, por graute, nas laterais e fundo da viga e armaduras. A força aplicada, os deslocamentos, as deformações no aço e no concreto foram medidas. As vigas de referência romperam por flexão com cargas próximas às calculadas. O reforço à flexão mostrou-se eficiente, elevando a capacidade portante em 44 % e a ruptura foi por cisalhamento no trecho sem reforço. Nas vigas com conectores o aumento foi superior.

Palavras-chave: structural strengthening, reinforced concrete structures, concrete-grout interface, connectors.

^a Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil, Piumhi, MG, Brasil;
^b Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Uberlândia, MG, Brasil.

Received: 01 Nov 2016 • Accepted: 25 Aug 2017 • Available Online:

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License

1. Introdução

Historicamente, e pode ser que ainda se mantenha, a realidade das construções no Brasil mostra que o número de estruturas em concreto armado suscetíveis de reabilitação aumenta à medida que elas envelhecem. Quando uma estrutura não é mais capaz de atender de maneira adequada às suas funções é necessário reabilitá-la, ou seja, torná-la apta a satisfazer com segurança à demanda da sociedade, ao nível original ou mais alto, tanto do ponto de vista da durabilidade quanto da resistência FIB [1]. Frequentemente elementos estruturais são danificados por uso impróprio, por acidentes ou pela falta de manutenção, tornando os serviços de recuperação estrutural uma tarefa comum.

A necessidade do reforço estrutural surge quando determinado elemento estrutural, ou toda a estrutura, não é mais capaz de resistir aos esforços solicitantes, podendo ainda ser utilizado quando há alterações no uso da edificação que proporcionam aumento do carregamento atuante e mudanças no sistema estrutural (Reis[2]), devido aos erros de projeto e/ou construção, materiais sem qualidade, ausência de manutenção periódica, variações térmicas intrínsecas e extrínsecas ao concreto e acidentes, tais como choques, sismos, incêndios, explosões (Simões[3]). Porém, tanto para o caso de recuperação ou de reforço, existem variáveis complexas neste tipo de intervenção.

Uma das variáveis é a ligação entre elementos moldados em diferentes idades, sendo um dos fatores que podem trazer sérias consequências quando não analisada e projetada de forma adequada. Esta ligação, entre substrato e concreto novo, é determinante para o desempenho, durabilidade e eficácia de todos os serviços de recuperação ou reforço estrutural, por conseguinte é de fundamental importância o conhecimento de sua influência. O projeto de recuperação ou reforço no Brasil não possuem normatização, conforme busca realizada no catálogo da ABNT. Além disto, os serviços de recuperação e reforço ocasionam em elevado custo e mão-de-obra especializada.

Na elaboração do projeto de reforço deve ser feita previamente a avaliação da estrutura existente, que envolve a informação disponível sobre projeto e obra, a realização de inspeção e a análise das condições de segurança.

É essencial, em serviços de reforço, o descarregamento de todas as cargas que possam ser removidas da estrutura, visando garantir a transmissão de tensões ao material utilizado no processo de reforço. Para garantir a eficiência do processo de reforço os materiais empregados devem possuir boa durabilidade, baixa permeabilidade, boa resistência, boa aderência ao concreto e aço, baixa retração, boa trabalhabilidade e propriedades compatíveis com o concreto e o aço (Simões[3]). Deve-se também conhecer as propriedades de deformabilidade, que engloba a retração, módulo de deformação longitudinal, coeficiente de dilatação térmica e coeficiente de Poisson. As deformações diferenciais entre substrato e concreto novo podem provocar tensões na interface da ligação, afetando a durabilidade do reforço e a capacidade de transferência de tensões (Reis[2]).

Existem diversos tipos de reforço à flexão de vigas. Alguns tipos propiciam também o reforço ao cisalhamento. O reforço por colagem de chapas de aço é uma técnica aplicada em casos de

deficiência nas armaduras existentes, mas quando as dimensões estruturais e a qualidade do concreto estão adequadas. O reforço por polímeros reforçados com fibras em geral é realizado em elementos que necessitam de acréscimos na região tracionada, porém são também empregados para o cisalhamento ou em pilares. Existem catálogos e livros sobre este tipo de reforço, em geral seguem normas internacionais (ACI[4] e FIB[5]).

O reforço por protensão externa de vigas de concreto armado consiste basicamente na introdução de solicitações contrárias às provocadas pelas cargas atuantes na estrutura, diminuindo as deformações e flechas. A introdução de solicitações contrárias pode ser promovida pela utilização de cordoalhas, fios ou barras, sendo capaz de incrementar a capacidade resistente do elemento estrutural através de uma componente vertical contrária às provocadas pelas cargas externas e permanentes. Para tal, dispositivos desviadores podem ser colocados entre os tendões e a estrutura para desviar o tendão, conforme necessário. Estes dispositivos e suas zonas de fixação tem que ser projetado para transferir as ações de projeto correspondente (FIB[1]). O reforço por protensão externa também pode reduzir aberturas de fissuras e flechas, redistribuir esforços em vãos de vigas, aumentar a capacidade portante das vigas e suprir a deficiência de armaduras internas.

O reforço por encamisamento, que foi o tipo empregado nesta pesquisa, é aplicado pela adição de concreto/argamassa armada aos elementos a serem reabilitados, mediante aumento da seção transversal ou substituição do material deteriorado. Ensaios similares foram realizados por Altun[6]. As vigas reforçadas por encamisamento são peças compostas, formadas pela ligação de dois concretos de diferentes idades, os quais possuem características distintas. Existe uma interface entre estes concretos, ou entre concreto e graute, a qual é responsável pela qualidade do reforço, promovida pela aderência. Tal aderência é necessária para impedir o deslizamento entre as partes para que a peça trabalhe monoliticamente.

O cálculo do reforço de vigas por encamisamento pode ser feito com base na NBR 6118 [7], considerando as tensões e deformações existentes antes do mesmo (FIB[1]).

Nas ligações concreto-concreto, moldadas em diferentes idades, deve ser considerada a transferência de esforços por meio das interfaces, as quais possuem como principal objetivo resistir aos esforços cisalhantes. A aderência da ligação entre substrato e concreto novo é necessária para garantir o comportamento conjunto da peça original e do reforço, de forma a se aproximar do comportamento de uma peça monolítica (ACI[8]). O tratamento da superfície de ligação é fundamental para obter uma ligação satisfatória entre o substrato e o concreto novo, visando obter melhores condições de aderência (FIB[1]). A superfície de ligação deve ser rugosa, isenta de poeira, graxa ou óleo, devendo ainda ser apicoada para retirada da nata de cimento superficial. Ensaios realizados por Cheong e Macalevey [9], verificaram a influência do tipo de apicoamento, da forma de ancoragem e da quantidade e tipo de ancoragem dos estribos.

Os principais fatores que influenciam a resistência da interface são a resistência do concreto, aderência da superfície do contato, rugosidade da superfície do contato, chaves de cisalhamento, armadura transversal e o tipo de carregamento. Os mecanismos de

transferência de tensões na interface podem ser por transferência por adesão, por atrito, por ações mecânicas e por armadura transversal que atravessa a interface, designados de conectores (FIB [1]).

O uso de conectores na interface de ligação promove o aumento da resistência aos esforços de cisalhamento, e a adoção de conectores atravessando a interface de ligação entre substrato e concreto novo é um recurso muito utilizado para obter o comportamento monolítico da peça reforçada (FIB [1]).

O presente trabalho tem como objetivo verificar a influência de conectores metálicos, colados na superfície de interface entre substrato e graute, no reforço à flexão de vigas produzido pelo aumento da seção transversal e adição de armaduras na região tracionada.

2. Materiais e programa experimental

2.1 Programa experimental

O programa experimental teve por objetivo avaliar a influência de conectores metálicos, colados na superfície de interface concreto-graute, designada neste trabalho como interface, no reforço à flexão de vigas produzido pelo aumento da seção transversal e adição de armaduras. As superfícies das interfaces de ligação foram lisas sem e com conectores metálicos colados. As superfícies de contato foram escovadas de modo a retirar a nata de cimento e aumentar a rugosidade. Os conectores foram fabricados com restos de barras de aço CA 50 de diâmetro de 10 mm, ou seja, de fácil fabricação.

Salienta-se que o estudo tem aspectos que diferem da maioria existente. O primeiro é que em grande parte dos estudos o reforço é devido à insuficiência de armadura, enquanto que será realizado o reforço para a região tracionada e comprimida. Outro aspecto importante é a aproximação dos ensaios a uma situação real: na prática pode-se fazer um pequeno alívio nas ações e o reforço é executado com a ação remanescente atuando na viga e, finalmente, ela é liberada para a ação total superior à de projeto inicial, assim será simulado no ensaio.

O programa experimental consiste de 15 vigas distribuídas em três séries de ensaio, cada série formada por 5 vigas, identificadas

de 1 a 5. Uma série de 5 vigas utilizadas para referência (VRef), ou seja, sem reforço, 5 vigas reforçadas com superfície do substrato lisa (VL) e 5 vigas reforçadas com superfície do substrato contendo conectores metálicos colados (VC).

As vigas de referência, denominadas de VRef, possuíam 200 cm de comprimento, vão de 180 cm, seção transversal retangular possuindo 12 cm de largura por 22 cm de altura e cobrimento de 3 cm.

O reforço nas vigas com superfície da interface lisa, com e sem conectores, foi realizado mediante o acréscimo nas laterais e no fundo da seção de 5 cm de graute SikaGrout® 250 em um comprimento de 140 cm. Os conectores foram colados na direção vertical utilizando o Sikadur® Epóxi, espaçados a cada 10 cm. A colagem dos conectores ocorreu com a viga em situação de pré-carregamento.

Para a confecção das vigas de referência foi utilizado concreto auto adensável usinado, de resistência à compressão de 20 MPa. Para a armadura das vigas de referência foram utilizadas 2Ø12,5 mm na armadura longitudinal inferior e 2Ø5 mm para a armadura longitudinal superior, cuja função era apenas de porta-estribos. Os estribos eram de Ø5 mm, espaçados a cada 10 cm. As vigas foram submetidas à aplicação de cargas em dois pontos (four points loading system), distantes de 60 cm dos apoios.

2.2 Cálculos para a viga de referência

O dimensionamento das vigas foi feito de tal modo que a posição da linha neutra fosse 40% da altura útil da viga e que sua ruptura fosse por tração na flexão, com escoamento da armadura longitudinal e esmagamento do concreto comprimido. Para determinação da altura útil, considerou-se que a armadura longitudinal teria diâmetro de 12,5 mm, os estribos 5 mm e o cobrimento de 3,0 cm, resultando numa altura útil de 17,875 cm. O momento fletor de cálculo, para estas condições, suportado pela viga foi obtido através da Equação 1.

$$M_d = 0,68 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot x \cdot (d - 0,4 \cdot x) \tag{1}$$

Onde: M_d é o momento fletor de cálculo, f_{cd} é a resistência de cálculo do concreto, b_w é a base da viga, x é a posição da linha neutra e d é a altura útil da viga.

Adotando-se o coeficiente de ponderação da resistência do concreto

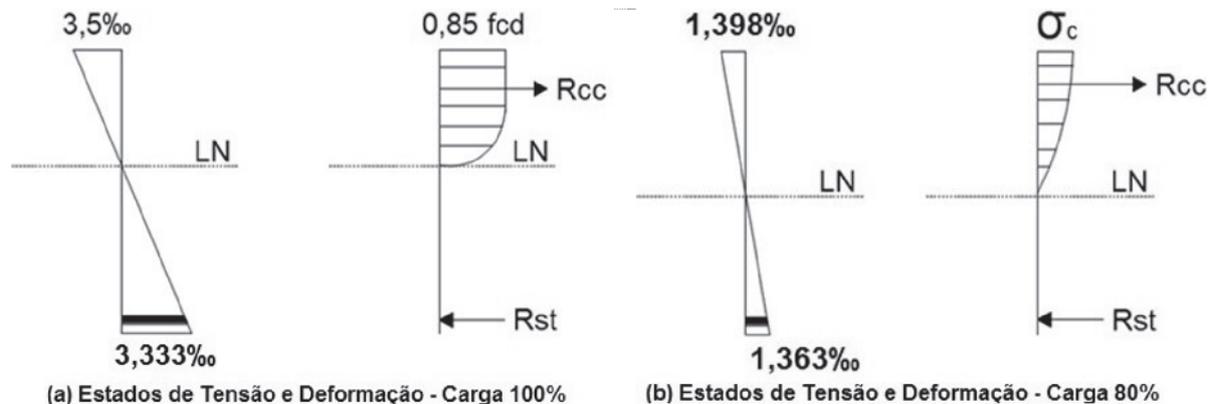


Figura 1 Estados de tensão e deformação na seção de referência

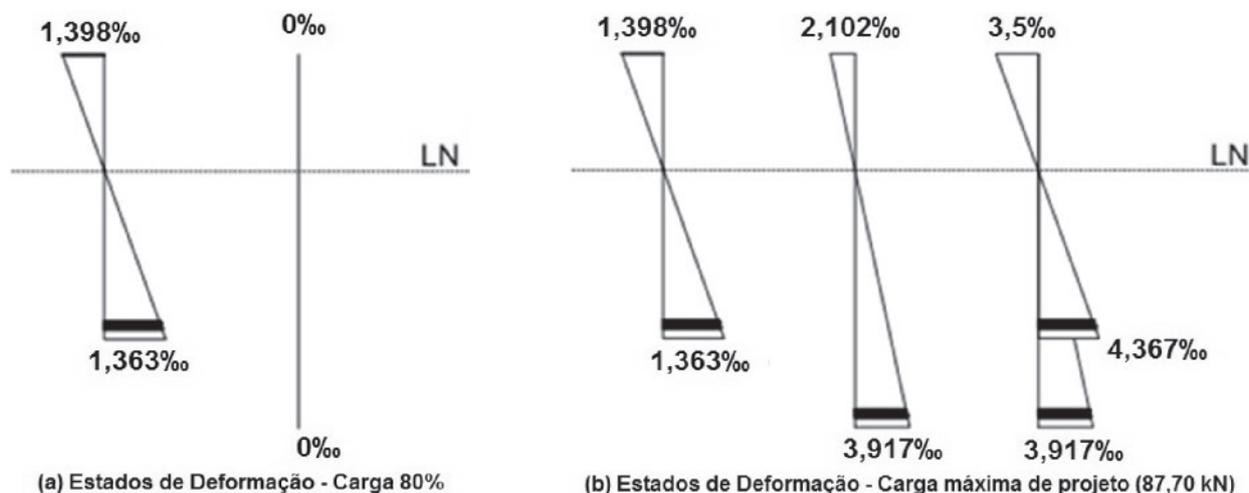


Figura 2
Estado de deformação da seção reforçada

de 1,4, resultou num momento fletor de cálculo de 12,51 kN × m. A armadura longitudinal de flexão necessária foi obtida pela aplicação da Equação 2, a qual resultou numa área de aço de 1,92 cm².

$$A_s = \frac{M_d}{f_{yd} \cdot (d - 0,4 \cdot x)} \quad (2)$$

Onde: A_s é a armadura longitudinal de tração, f_{yd} = 43,48 kN/cm² é a tensão de escoamento de cálculo da armadura.

Com a armadura para a tração adotada de 2ø12,5 mm, a linha neutra passa de 0,4×d para 0,513×d, ocasionando o aumento do momento fletor resistente de cálculo para 15,16 kN×m. Para atingir este momento fletor de cálculo, considerando que o peso próprio da viga produz um momento fletor de cálculo de 0,33 kN×m, a carga F_d total a ser aplicada é de 49,45 kN. Esse valor foi obtido considerando os coeficientes da NBR 8681 [9], porém como a carga será controlada e com pequena variação foi adotado um coeficiente menor portanto a carga de projeto considerada 100% será de 42,5 kN.

Na Figura 1 são apresentados os estados de tensão e deformação da seção da viga de referência com 100% e 80% das carga permanente atuando nas vigas. A tensão no concreto para a seção submetida a 80% da carga foi obtida conforme item 8.2.10.1 da NBR 6118 [7].

O dimensionamento da armadura transversal foi feito adotando o modelo de cálculo I da NBR 6118 [7], o qual admite diagonais de compressão inclinadas de 45° em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural e que a parcela de força cortante resistida por mecanismos complementares ao modelo em treliça tenha valor constante. A armadura de aço foi obtida através da Equação 3.

$$A_{sw} = \frac{V_{sw}}{0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}} \quad (3)$$

Onde: A_{sw} : área da armadura transversal; V_{sw} : parcela da força cortante resistida pela armadura transversal; d : altura útil da viga; f_{ywd} : resistência de cálculo do aço.

Considerando a força de cálculo no projeto de 49,45 kN e o peso próprio, o cortante produzido será de 25,56 kN. A parcela de

força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça (V_{co}) é de 14,22 kN. Utilizando para a armadura transversal estribos de ø5,0 mm, a área calculada de armadura transversal é de 1,615 cm²/m, portanto ø5,0 mm espaçados a cada 24 cm. Devido ao espaçamento máximo permitido, foi utilizado ø5,0 mm espaçados a cada 10 cm. O uso destes estribos permite que a viga seja submetida a um esforço cortante de cálculo até 41,69 kN, sendo 14,22 kN do V_{co} e 27,47 kN da armadura transversal (V_{sw}). A força total F_d, descontado o cortante de cálculo produzido pelo peso próprio de 0,83 kN, poderá ser de 81,72 kN aplicado na viga, ou seja, 40,86 kN por ponto.

2.3 Cálculos para a viga reforçada

A viga de referência executada tem sua capacidade de resistir em flexão a 15,16 kN×m e de 81,72 kN para o cisalhamento. Como o reforço não será para o cisalhamento, foi calculado inicialmente para a carga de cálculo aplicada de 81,72 kN, portanto um momento fletor total de cálculo de 24,90 kN × m.

A seção da viga original, após ter redução da carga, não trabalha no Estado Limite Último, sendo que a nova posição da linha neutra foi obtida mediante as equações de equilíbrio e deformações. Na Figura 2 são ilustrados os estados de deformação da seção da viga original com carga F_d = 49,45 kN (ELU) ou F_k = 35,32 kN e para a carga máxima do projeto após o reforço (87,70 kN), indicando que a ruptura provavelmente ocorrerá por cisalhamento. A tensão no concreto para a seção submetida a 80% da carga de projeto (34 kN) foi obtida conforme item 8.2.10.1 da NBR 6118 [7]. A tensão no graute foi obtida conforme item 8.2.10.1 da NBR 6118 [7], adotando comportamento similar ao concreto, por ser material cimentício. Foi adotado para obtenção da tensão do graute o fator de minoração igual a 0,85 (efeito Rüschi) devido não se conhecer até o momento estudo sobre este efeito no material.

A partir das equações de equilíbrio, considerando o graute com resistência de 50 MPa, obteve-se área de aço de 2,122 cm² para a armadura do reforço. Devido à necessidade de colagem de extensômetros nas barras, optou-se pela colocação de

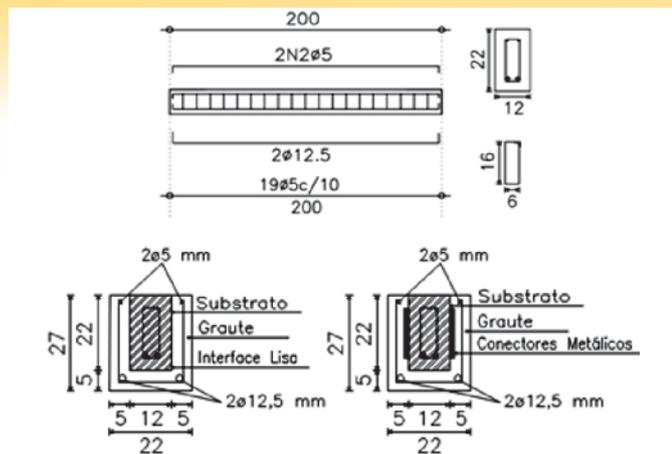
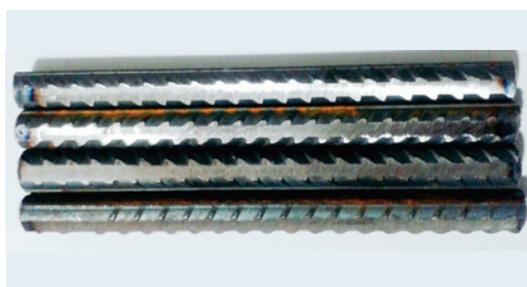


Figura 3
Informações de geometria e armação das vigas

2ø12,5 mm. Com essa armadura e o graute, a seção reforçada terá um momento fletor resistente de cálculo de 37,16 kN × m. Para atingir esse momento fletor será necessária uma carga característica aplicada de 87,70 kN, indicando que a ruptura, provavelmente, ocorrerá por cisalhamento. Portanto, as armaduras do reforço foram 2ø12,5 mm na armadura longitudinal inferior e 2ø5,0 mm e na armadura longitudinal superior. Os estribos foram de ø5,0 mm, espaçados a cada 10 cm. Os valores apresentados para os momentos fletores resistentes são de projeto e contemplam os critérios de segurança utilizados pelas normas e consideram que haverá a ligação perfeita entre o concreto e o graute. Desta forma, espera-se que os valores obtidos nos ensaios sejam superiores. As informações de geometria e armação das vigas reforçadas são apresentadas na Figura 3.

2.4 Conectores metálicos

Os conectores metálicos foram colocados tendo em vista uma

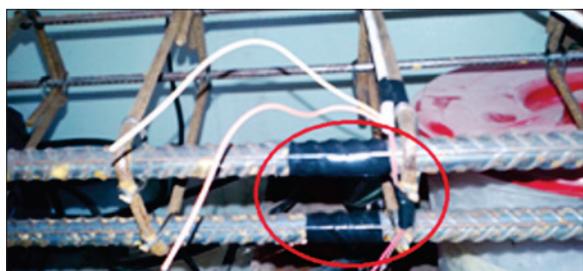


a) Vista dos conectores

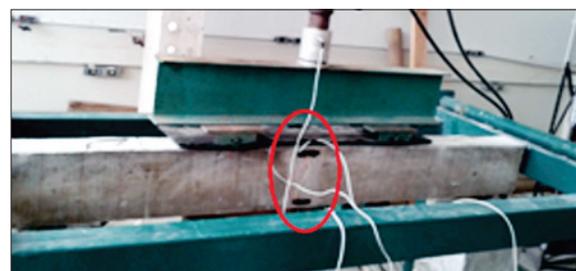


b) Conectores colados à cada 10 cm

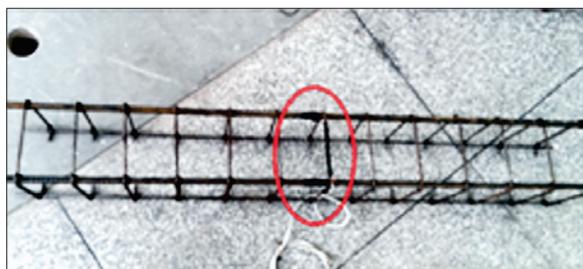
Figura 4
Detalhe dos conectores



a) Extensômetros colados na parte central da armadura longitudinal de tração da viga original



b) Extensômetros colados nas laterias da viga original (região tracionada e comprimida)



c) Extensômetros colados na parte central da armadura longitudinal de tração do reforço



d) Extensômetros colados nas laterias do reforço (região tracionada e comprimida)

Figura 5
Esquema de localização dos extensômetros

Tabela 1

Informações do concreto das vigas

Idade (dias)	Resistência à compressão-média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de variação %	Módulo de elasticidade-média (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coefficiente de variação %
7	12,85	1,56	12,14	-	-	-
28	21,99	0,04	0,18	19,89	1,03	5,18

possível falha parcial na ligação entre concreto e graute. Projetou-se conectores simples e que possam ser confeccionados na obra com material comum. Assim, eles foram produzidos utilizando barras de aço nervuradas de $\varnothing 10$ mm, possuindo 15 cm de comprimento, sendo que em parte da superfície foram removidas área das mossas para colagem no substrato. Os mesmos foram colados nas vigas parcialmente descarregadas e, posteriormente, foram colocadas as armaduras, as formas e aplicado o graute (Figura 4).

2.5 Posição dos extensômetros

As medidas de deformações no aço foram obtidas através de extensômetros elétricos de resistência unidirecionais, com dimensão longitudinal de 0,250". No concreto foram unidirecionais com dimensão longitudinal de 1,000", ambos com resistência de 120 Ohms. As flechas foram obtidas por dispositivo de medição de deslocamento linear, sendo todo o comportamento estrutural das vigas, durante a realização dos ensaios, registrados através de sistema de aquisição de dados. Inicialmente foram fixados os extensômetros nas armaduras depois no concreto da viga de referencia e após o carregamento parcial e reforço, foram fixados no graute, conforme indicado na Figura 5.

2.6 Programa de aplicação das forças e obtenção dos resultados

A aplicação de forças ocorreu em dois pontos (four point loading system), distantes de 60 cm dos apoios, conforme Figura 6. As vigas, antes de serem reforçadas, foram carregadas com carga total de projeto até a estabilização da flecha. Para o

serviço de reforço, as vigas foram parcialmente descarregadas, permanecendo 80% da carga (34 kN), considerando um alívio de 20% da carga acidental para a estrutura.

Após a conclusão do serviço de reforço e espera das 24 horas para obtenção de resistência do graute, as vigas reforçadas foram submetidas à carga total de projeto e posteriormente até a ruptura.

3. Resultados e discussões

O concreto, produzido para as vigas, teve a resistência à compressão determinada aos 7 dias, 28 dias e na data do ensaio das vigas e o módulo de elasticidade aos 28 dias e na data do ensaio das vigas, conforme a NBR 5739 [11] e NBR 8522 [12], respectivamente. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Os ensaios das barras de aço foram realizados obedecendo às especificações da NBR 7480 [13]. Os resultados obtidos estão indicados na Tabela 2.

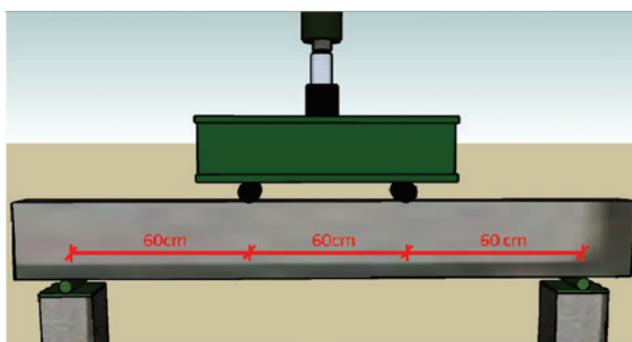
3.1 Vigas de referência

Na época dos ensaios das vigas de referência, o concreto

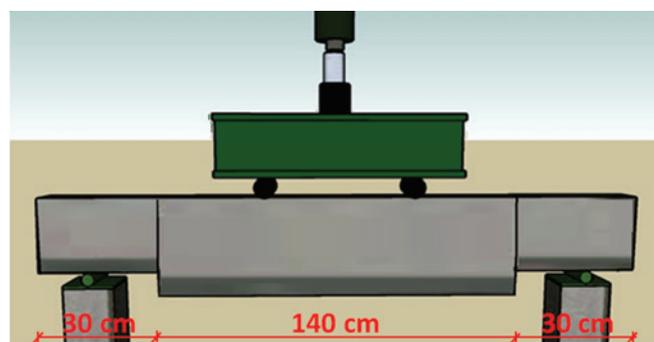
Tabela 2

Características mecânicas do aço

Diâmetro (mm)	Tensão de escoamento média (MPa)	Tensão de ruptura média (MPa)	Alongamento médio em 10 \varnothing
12,5	601	719	11,73



a) Vigas sem reforço



b) Vigas reforçadas

Figura 6

Esquema de ensaio das vigas

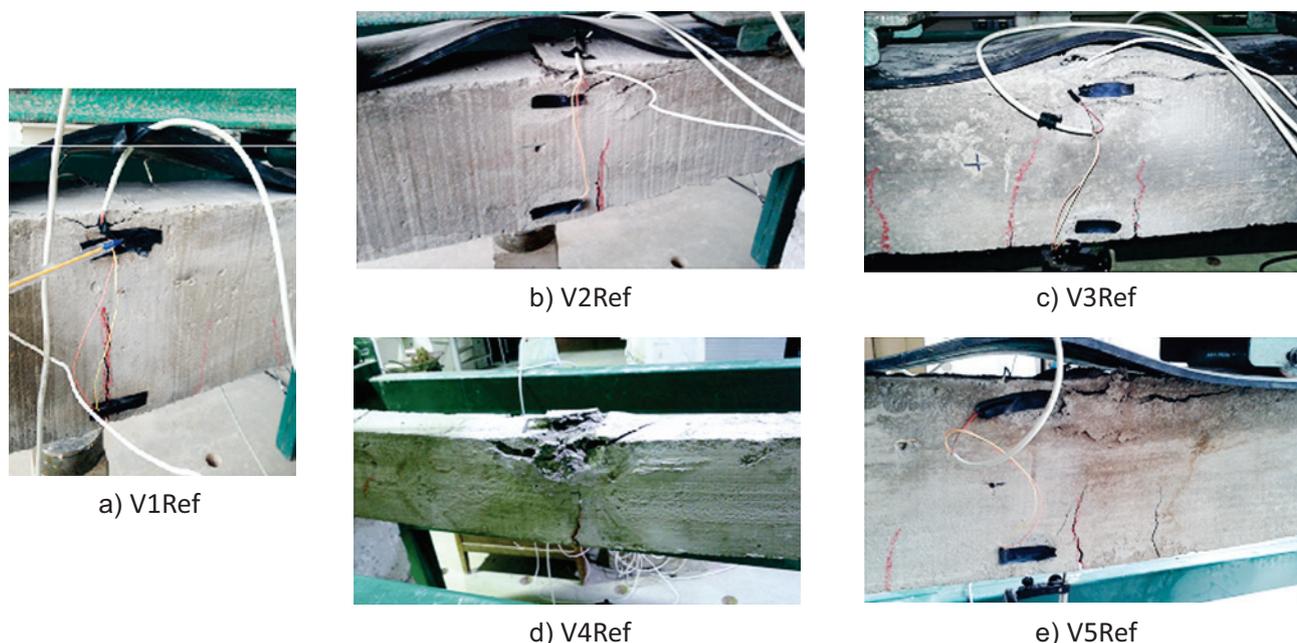


Figura 7
Vista da parte central das vigas de referência rompidas por flexão

Tabela 3
Resultados das vigas de referência

Viga	1ª fissura (kN)	Tipo de fissura	Flecha 100% carga (mm)	Ruptura				
				Flecha (mm)	Carga (kN)	Carga média (kN)	Desvio padrão (kN)	Ceficiente de variação %
V1Ref	65,00	Cisalhamento	6,16	17,95	74,36	72,15	1,712	2,37
V2Ref	68,27	Flexão	6,32	12,32	71,87			
V3Ref	62,30	Flexão	6,02	13,75	73,34			
V4Ref	54,70	Flexão	6,81	12,31	70,08			
V5Ref	65,00	Flexão	5,49	13,27	71,12			

apresentou resistência à compressão de 22,78 MPa e módulo de elasticidade de 27,04 GPa. Verifica-se que o módulo de elasticidade atingiu o valor compatível com o estimado pela equação da NBR 6118 [7].

Das 5 vigas de referência ensaiadas, 4 tiveram fissura inicial devido à flexão (V2Ref à V5Ref) e V1Ref apresentou fissura inicial de cisalhamento. Todas as vigas sofreram ruptura por flexão. Na Figura 7 pode-se notar as fissuras características no centro das vigas de referência. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos durante os ensaios das vigas de referência.

Pelo comportamento estrutural das vigas de referência durante a realização dos ensaios foi possível verificar que:

- As primeiras fissuras nas vigas apareceram com um carregamento médio de 65,14 kN, excetuando a V4Ref que obteve a primeira fissura, devido à flexão, com um carregamento de 54,7 kN. Considerando todas as cargas que originaram a primeira fissura o carregamento médio foi de 63,05 kN.
- As cargas de ruptura das vigas ficaram próximas, obtendo-se

carga de ruptura média de 72,15 kN e desvio padrão de 1,712 kN. O coeficiente de variação - CoV de 2,37 % - indica uniformidade no comportamento das vigas, portanto pode-se considerar que, para efeito comparativo, os resultados são consistentes.

- Considerando a resistência do concreto de 22,78 MPa, obtida na data do ensaio, a carga calculada de ruptura na qual considerou-se os coeficiente iguais a 1, aumenta de 49,45 kN para 73,83 kN, a qual ficou próxima da carga de ruptura média obtida durante os ensaios (72,15 kN).
- Analisando a relação carga x deslocamento, foi possível verificar que os deslocamentos verticais para todos os ensaios ficaram bem próximos, com média de 6,16 mm, quando analisado carga aplicada de projeto, sendo o desvio padrão dos deslocamentos obtidos para 100% da carga de aplicada igual a 0,478 mm, resultando em um CoV de 7,77%. Na ruptura, os deslocamentos verticais tiveram média de 13,92 mm e o CoV foi de 16,79%.
- A deformação média no aço obtida para 100% da carga foi de 1,878‰ e para 80% da carga foi de 1,538‰. A deformação

Tabela 4

Informações dos materiais na época do ensaio – vigas com interface lisa sem conectores

Viga	Resistência do substrato (MPa)	Módulo de elasticidade do substrato (GPa)	Resistência do graute (MPa)	Módulo de elasticidade do graute (GPa)
VL1	23,61	24,15	33,26	29,24
VL2	23,61	24,15	34,09	29,45
VL3	23,16	24,73	32,18	29,20
VL4	23,16	24,73	23,90	23,60
VL5	21,05	24,13	26,30	26,50

calculada considerando 100% da carga de projeto foi de 3,333% e para 80% da carga de projeto foi de 1,363%.

- A deformação média na face comprimida do concreto obtida para 100% da carga foi de 0,7146% e para 80% da carga foi de 0,6359%. A deformação considerada para 100% da carga de projeto foi de 3,5% e para 80% da carga de projeto foi de 1,398%.
- Considerando todas as vigas de referência, a deformação média na face comprimida do concreto obtida no momento da ruptura foi de 1,764%. A V1Ref sofreu uma deformação bem maior, se comparada às demais, apresentando deformação de 2,649%, sendo ela a única viga de referência que rompeu por cisalhamento.

3.2 Vigas reforçadas sem conectores

Na época da realização dos ensaios das vigas com superfície da interface de ligação lisa, o concreto substrato e o graute apresentavam as características descritas na Tabela 4.

Devido os intervalos entre os ensaios das vigas terem sido aproximadamente 30 horas, foram utilizados 4 corpos de prova cilíndricos para determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto substrato para cada 2 vigas. Para o graute, a determinação da resistência à compressão e

módulo de elasticidade foi realizada para cada viga ensaiada. Todos estes ensaios seguiram os procedimentos das normas da NBR 5739 [11] e NBR 8522 [12], respectivamente.

Das 5 vigas com interface lisa sem conectores ensaiadas, apenas a VL1 apresentou fissura à flexão durante o pré-carregamento, sendo o aparecimento da fissura quando aplicada carga de 44,98 kN. Na Figura 8 pode-se notar as fissuras características nas vigas reforçadas sem conectores. Na Tabela 5 estão indicados os resultados das flechas, das cargas de ruptura e os tipos de ruptura obtidos para as vigas de interface lisa sem conectores.

Analisando os resultados obtidos durante os ensaios é possível verificar que:

- As primeiras fissuras, após o serviço de reforço das vigas, surgiram com uma aplicação de carga média de 68,60 kN, desvio padrão de 13,61 kN (CoV= 19,84%).
- Nenhuma das vigas reforçadas apresentou fissura devido à tração no graute.
- A carga média de ruptura das vigas reforçadas com interface lisa sem conectores foi de 104,08 kN, apresentado um desvio padrão de 8,77 kN (CoV= 8,37%).
- Analisando o deslocamento das vigas na ruptura, foi possível verificar que os valores ficaram bem próximos, sendo 12,9 mm a média obtida para o deslocamento, no qual obteve desvio padrão de 1,52 mm (CoV de 11,78%).

Tabela 5

Resultados das vigas com interface lisa sem conectores

Viga	Carga 1ª fissura após reforço (kN) / tipo de fissura	Flecha (mm)			Carga de ruptura (kN)	Tipo de ruptura
		80% carga	100% carga	Ruptura		
VL1	85,61 / cisalhamento	7,00	7,10	10,87	90,87	Cisalhamento substrato / descolamento do graute
VL2	70,64 / cisalhamento	6,32	6,84	13,37	102,03	Cisalhamento substrato / ruptura e descolamento do graute
VL3	53,80 / cisalhamento	6,64	7,23	12,96	113,01	Cisalhamento substrato / ruptura e descolamento do graute
VL4	76,99 / cisalhamento	6,80	6,98	15,03	103,42	Cisalhamento substrato / ruptura do graute
VL5	56,00 / cisalhamento	6,38	7,21	12,27	111,09	Cisalhamento substrato / ruptura e descolamento do graute
Carga de ruptura média = 104,08 kN						

- Todas as vigas tiveram pré-fissuração devido ao cisalhamento e sofreram ruptura por cisalhamento do substrato, variando-se pela ruptura e pelo descolamento do graute.
- A viga VL4 apresentou um desvio significativo na leitura da deformação na armadura longitudinal de tração do reforço, porém após este instante ela retornou para uma leitura mais próxima das anteriores. A mesma viga (VL4) também apresentou uma leitura que indicou que a face superior do concreto do substrato após o serviço de reforço foi aliviada, gerando uma deformação menor para as maiores tensões atuantes.
- A deformação média na armadura longitudinal de tração do substrato no momento da ruptura foi de 2,089‰, apresentando um desvio padrão de 0,535‰ (CoV= 25,61%).
- A deformação média na face comprimida do graute obtida no momento da ruptura foi de 0,449‰, apresentando um desvio padrão de 0,130‰ e para a armadura longitudinal de tração do reforço a deformação média obtida no momento da ruptura foi de 1,317‰. Salienta-se que para o cálculo da deformação média para a armadura de tração do reforço foram consideradas as deformações da VL1, VL2 e VL5, tendo em vista que para as demais vigas a aquisição de dados não registrou os valores para essas deformações. A VL1 apresentou um valor de deformação menor tanto para o graute quanto para a armadura de tração do reforço, se comparada às demais, apresentando deformação de 0,246‰ para o graute e 1,000‰ para a armadura. Portanto o reforço para esta viga foi o que menos suportou o



a) Fissura de cisalhamento no substrato



b) Fissura de cisalhamento no apoio de viga



c) Ruptura no graute



d) Deslocamento no graute



e) Aspecto final da viga (face esquerda)



f) Aspecto final da viga (face direita)

Figura 8
Detalhes da VL3 após o ensaio

acréscimo de carga, tendo a ruptura ocorrida com a menor carga aplicada em relação às demais vigas reforçadas com superfície da interface lisa.

Os valores das deformações para as vigas reforçadas com interface lisa sem conectores estão relacionados na Tabela 6.

3.3 Vigas reforçadas com conectores

Na realização dos ensaios das vigas com superfície da interface lisa com conectores metálicos colados, o concreto do substrato e o graute apresentavam as características descritas na Tabela 7.

Tabela 6

Deformações dos elementos constituintes das vigas no momento da ruptura

Viga	Face superior concreto substrato (‰)	Armadura longitudinal de tração do substrato (‰)	Face superior do graute (‰)	Armadura longitudinal de tração do reforço (‰)
VL1	0,611	1,844	0,246	1,000
VL2	0,986	1,531	0,428	1,572
VL3	0,259	2,565	0,539	X
VL4	0,042	2,751	0,449	X
VL5	0,997	1,752	0,583	1,378

Tabela 7

Informações dos materiais na época do ensaio – vigas com conectores

Viga	Resistência do substrato (MPa)	Módulo do substrato (GPa)	Resistência do graute (MPa)	Módulo do graute (GPa)
VC1	21,05	24,13	27,90	23,80
VC2	24,07	22,76	23,27	26,37
VC3	24,07	22,76	21,68	25,21
VC4	23,00	22,94	16,94	24,85
VC5	23,00	22,94	23,72	26,99



a) Fissura no graute apoio direito/face direita



b) Fissura cisalhamento apoio direito/face esquerda



c) Fissura cisalhamento apoio direito/face direita



d) Fissura no graute apoio direito/face esquerda



e) Ruptura na viga por cisalhamento apoio esquerdo/face direita



f) Aspecto final da viga após ruptura apoio esquerdo/face esquerda

Figura 9

Detalhes da VC4 após o ensaio

Tabela 8

Resultados das vigas com conectores metálicos colados

Viga	Carga 1ª fissura após reforço (kN) / tipo de fissura	Flecha (mm)			Carga de ruptura (kN)	Tipo de ruptura
		80% carga	100% carga	Ruptura		
VC1	71,73 / Cisalhamento	5,84	6,52	12,28	106,44	Cisalhamento substrato / Ruptura e descolamento do graute
VC2	75,36 / Cisalhamento	5,41	6,22	11,57	106,75	Cisalhamento substrato / Descolamento do graute
VC3	72,54 / Cisalhamento	8,05	8,08	13,86	97,05	Cisalhamento substrato / Ruptura e descolamento do graute
VC4	79,46 / Cisalhamento	7,05	7,36	14,42	114,09	Cisalhamento substrato / Ruptura do graute
VC5	82,79 / Cisalhamento	6,33	6,42	11,97	106,16	Cisalhamento substrato / Descolamento do graute
Carga de ruptura média = 106,10 kN						

Tabela 9

Deformações nos componentes das vigas no momento da ruptura

Viga	Face superior concreto substrato (‰)	Armadura longitudinal de tração do substrato (‰)	Face superior do graute (‰)	Armadura longitudinal de tração do reforço (‰)
VC1	6,145	2,338	0,426	1,526
VC2	0,204	2,144	0,494	X
VC3	0,368	2,198	0,386	1,036
VC4	2,003	2,448	0,635	1,683
VC5	0,449	1,678	0,452	1,349

Semelhante às vigas de interface lisa sem conectores colados, os intervalos entre os ensaios das vigas também foi de aproximadamente 30 horas, sendo utilizados 4 corpos de prova cilíndricos para determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto substrato para cada 2 vigas, excetuando-se a VC1 que foi ensaiada em data próxima a VL5, no qual para ambas foram adotadas as mesmas características do corpo de prova. E para o graute, a determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade foram realizadas para cada viga ensaiada. Estes ensaios também seguiram os procedimentos das normas da NBR 5739 [11] e NBR 8522 [12], respectivamente. Das 5 vigas de interface lisa com conectores metálicos ensaiadas, duas vigas apresentaram fissuras à flexão durante o pré-carregamento, VC3 e VC5, sendo o aparecimento das fissuras quando aplicada as cargas de 43,31 kN e 43,29 kN, respectivamente. Na Figura 9 pode-se notar as fissuras características nas vigas reforçadas com conectores.

■ Os resultados das flechas, das cargas de ruptura e os tipos de ruptura obtidos para as vigas com conectores metálicos colados são apresentados na Tabela 8, sendo possível verificar

que: As primeiras fissuras, após o serviço de reforço das vigas, surgiram com uma aplicação de carga média de 76,37 kN, obtendo um desvio padrão de 4,69 kN, tendo apresentado para a maioria das vigas ensaiadas valores superiores aos das vigas que não tiveram os conectores metálicos colados. A partir deste resultado é possível verificar que o conector metálico colado contribui, ainda que com pequena parcela, para a resistência de cisalhamento.

- Nenhuma das vigas ensaiadas apresentou fissuras de flexão no reforço.
- A carga média de ruptura das vigas reforçadas de interface lisa com conectores metálicos colados foi de 106,10 kN, apresentado um desvio padrão de 6,04 kN.
- Analisando o deslocamento das vigas na ruptura, foi possível verificar que os valores ficaram bem próximos, sendo 12,82 mm a média obtida para o deslocamento, no qual obteve desvio padrão de 1,24 mm (CoV=9,67%).
- Todas as vigas, após o reforço da seção, tiveram pré-fissuração devido ao cisalhamento e sofreram ruptura por cisalhamento do substrato, variando-se pela ruptura e pelo descolamento do graute.

Tabela 10

Análise de variância – fator único

Análise entre grupos	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Influência
VR, VL e VC	2723,92	2	1361,96	30,39	9,94E-05	4,256	Sim

SQ é a soma dos quadrados de todos os desvios em relação à média de todas as observações (entre e dentro das amostras); gl é o grau de liberdade; MQ é a média quadrática (entre e dentro das amostras).

$$F = \frac{\text{Variância entre amostras}}{\text{Variância dentro das amostras}}$$

valor-P é a probabilidade de a hipótese nula ser verdadeira. Adotou-se o nível de significância do teste de 0,05
F crítico é o valor calculado em função do nível de significância e dos graus de liberdade da variância entre e dentro das amostras.

Os valores das deformações para as vigas reforçadas de interface lisa com conectores metálicos colados são relacionados na Tabela 9.

- A viga VC1 apresentou leitura da deformação na face superior do concreto substrato incoerente em relação as demais. Ressalta-se que esta leitura pode ter sido ocorrida devido falha nos dispositivos constituintes do sistema de medição.
- A viga VC4 apresentou deformação na face superior do concreto substrato de 2,003%, sendo um valor consideravelmente maior se comparado às vigas VC2, VC3 e VC5, porém tal deformação era possível considerando os domínios 2 e 3 de deformações.
- A deformação média na armadura longitudinal de tração do substrato no momento da ruptura foi de 2,161%, apresentando um desvio padrão de 0,295%.

A deformação média na face comprimida do graute obtida no momento da ruptura foi de 0,479%, apresentando um desvio padrão de 0,096% e para a armadura longitudinal de tração do reforço a deformação média obtida no momento da ruptura foi de 1,399%, o qual apresentou desvio padrão de 0,277%. Salienta-se que para o cálculo da deformação média para a armadura de tração do reforço não foi considerada a deformação da VC2 devido não ter sido registrado os dados referentes a esta informação. Os valores apresentados e discutidos para a carga de ruptura foram distintos, indicando que os tipos de reforço influenciaram nos resultados. Para uma análise mais consistente, foi realizada a análise de variância - ANOVA, entre os resultados do grupo das vigas de referência, das vigas com superfície da interface lisa e das vigas com superfície da interface lisa com conectores metálicos colados, considerando a carga de ruptura. Embora várias vigas tenham rompido por cisalhamento, a rigidez da parte reforçada pode ter influenciado nos mecanismos de distribuição de tensões, permitindo as variações de carga verificadas. Na Tabela 10, são apresentados os valores da ANOVA. Verifica-se que há evidências de que o tipo de reforço influenciou na carga de ruptura, pois F obtido foi maior que F crítico e, também, o valor-P foi inferior a 0,05.

4. Conclusões

O reforço por encamisamento utilizando graute é uma técnica que permite aumentar a capacidade portante das vigas, sendo verificado que houve aumento, em relação à flexão, de 44,25% e 47,05% para as vigas de interface lisa sem e com conectores metálicos, respectivamente.

O cálculo do reforço utilizando os estados de tensão e deformação chegou a valores aproximados dos obtidos durante o ensaio, quando não considerados os coeficientes de segurança.

Ressalta-se que as vigas poderiam ter atingido valores de carga superiores caso não tivessem ruptura por cisalhamento do substrato. Por este motivo considerou-se que a capacidade portante à flexão não foi maior devido a todas as vigas após o reforço terem rompido por cisalhamento no substrato.

O tratamento da superfície, no qual consistiu apenas na remoção da camada da nata de cimento, favoreceu a aderência quando aplicado o graute como material de reforço.

Foi possível verificar que os deslocamentos médios das vigas reforçadas (sem e com conectores) ficaram bem próximos. O conector metálico contribuiu, ainda que em pequena parcela (2,8%), para a resistência ao cisalhamento atuante na interface,

sendo o fator limitante o destacamento da camada de cobrimento do concreto, na qual estava colado.

Salienta-se que o objetivo inicial da pesquisa foi verificar a possibilidade de utilizar este tipo de conector colado, ou seja, sem que haja perfurações nas vigas. Tal objetivo foi parcialmente atingido e mostrou-se promissor

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à UFU – Universidade Federal de Uberlândia pelo fornecimento de estrutura para realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

- [1] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. Model Code 2010. Switzerland, 2010. v. 1.
- [2] REIS, A. P. A. Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.
- [3] SIMÕES, M. L. F. Reforço à flexão de vigas de concreto armado por encamisamento parcial. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [4] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 440.2R-08 Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills. MI-USA. 2008.
- [5] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON – FIB. FRP reinforcement in RC structures. Technical Report. Bulletin 40. Switzerland, 2007
- [6] ALTUN, F. An experimental study of the jacketed reinforced-concrete beams under bending. In: Construction and Building Materials. v.18, 2004. p.611-618.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: 2014.
- [8] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, MI-USA, 2011.
- [9] CHEONG, H. K.; MACALEVEY, N. Experimental behavior of jacketed reinforced concrete beams. In: ASCE Journal of Structural Engineering. V.126, 2000. p.692-699.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas – Procedimento. Rio de Janeiro: 2003.
- [11] _____. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: 2007.
- [12] _____. NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro: 2008.
- [13] _____. NBR 7480: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação. Rio de Janeiro: 2007.