

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

R. J. C. Silva^{1*} , M. B. S. Muniz¹ , F. E. S. da Silva Júnior² , É. M. F. Lima³ , C. V. dos S. Araújo⁴ .

*Autor de contato: ricardo.carvalho222@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.213>

Recebido: 03/07/2017 | Aceito: 01/08/2018 | Publicado: 30/12/2018

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo analisar a eficiência do reforço em vigas de concreto armado através da adição de barras de aço e adesivo estrutural epóxi. Foram produzidas cinco vigas, das quais, quatro receberam reforço, e duas delas além da barra de aço foram utilizados grampos em “U” para melhorar a ancoragem das barras. Das quatro vigas reforçadas, duas foram reforçadas à flexão somente na região de flexão pura e duas foram reforçadas tanto na região da flexão simples como na região da flexão pura. Uma das cinco vigas foi a de referência e não recebeu reforço. Através da análise dos resultados, constatou-se que dentre as vigas reforçadas, a inserção dos grampos influenciou negativamente no modo e na carga de ruptura da viga, enquanto as vigas que não receberam os grampos, chegaram a ruína com cargas superiores.

Palavras-chave: Reforço, Viga, Concreto Armado.

Citar como: R. J. C. Silva, M. B. S. Muniz, F. E. S. da Silva Júnior, É. M. F. Lima, C. V. dos S. Araújo (2019), “Análise experimental de vigas de concreto armado reforçadas com barras de aço e adesivo epóxy estrutural”, Revista ALCONPAT, 9 (1), pp. 65 – 78, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.213>

¹ Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, Brasil

² Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, Brasil

³ Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil

⁴ Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2019.

Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened with steel bars and epoxy structural adhesive

ABSTRACT

This work was aimed at analyzing the efficiency of the strengthening of reinforced concrete beams with the addition of steel bars and epoxy adhesive. Five beams were produced, out of which four beams were strengthened to flexure. In two of them, “U” clips were also used to improve the anchorage of the strengthening. The tests demonstrated that the clips reduced the resistances of the beams compared to those without clips. The strengthened beams without clips yielded better results, but the largest limiting factor was the adherence between the epoxy and beam. The use of clips for solving the problem of adherence made this research original. The conclusions were based on the comparisons of the tested beams.

Keywords: Strengthening; Beam; Reinforced Concrete; Jacketing.

Análisis experimental de vigas de hormigón armado reforzadas con barras de acero y adhesivo epoxy estructural

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo analizar la eficiencia del refuerzo en vigas de hormigón armado mediante la adición de barras de acero y adhesivo epoxi. Se produjeron cinco vigas. Cuatro recibieron refuerzo a flexión, y en dos de ellas fueron adicionadas también abrazaderas “U” para mejorar el anclaje del refuerzo. Los ensayos mostraron que las abrazaderas redujeron la resistencia de las vigas, en comparación con las que no tenían. Las vigas reforzadas sin abrazaderas obtuvieron mejores resultados, pero el factor limitante más importante fue la adherencia entre el epoxi y la viga. El uso de abrazaderas para intentar resolver el problema de la adherencia dio originalidad a esta investigación. Las conclusiones se basaron en la comparación entre las vigas ensayadas.

Palabras clave: Reforzamiento; Viga; Hormigón Armado; Encamisado

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de reabilitar estruturas de concreto armado pode estar aliada tanto a falta de manutenção no decorrer de sua vida útil quanto à adequação de novos usos da estrutura, já que a opção de demolir e reconstruir torna-se inviável. Neste caso, vem se desenvolvendo cada vez mais estudos na área de recuperação reforço de estruturas em concreto armado. No entanto, apesar desse ramo da Engenharia Estrutural está em desenvolvimento, ainda não há uma metodologia específica de análise do comportamento estrutural da peça reabilitada.

Segundo Reis (1998), o aprofundamento em pesquisas científicas com relação à reabilitação de estruturas de concreto armado é de extrema relevância principalmente para definir melhor as regras do dimensionamento, o comportamento das estruturas reforçadas ao longo do tempo e as formas de se analisar a aderência entre os materiais envolvidos, bem como suas propriedades. Tais estudos possibilitariam determinar quais os materiais, técnicas, procedimentos e normas mais adequadas a serem adotadas durante a realização de uma reabilitação estrutural.

Portanto, a literatura sobre o reforço de vigas de concreto armado, tais como os trabalhos de Helene (Helene, 2000), Cheong e MacAlevey (Cheong e MacAlevey, 2000), Reis (Reis, 2003), Alfaiate e Costa (Alfaiate e Costa, 2004), Altun (Altun, 2004), Santos (Santos, 2006), Lima (Lima, 2015) e Deghenhard et al. (Deghenhard et al., 2016) têm sido extremamente importantes para o avanço das pesquisas nessa área.

Ainda que esteja disponível muitas técnicas de reforço, este trabalho irá abordar sobre o método de reabilitação de vigas de concreto armado através da introdução de barras de aço e adesivo estrutural epóxi (revestimento). O estudo desta técnica, apesar de estar desatualizado, ainda é muito importante devido a duas razões simples. Em primeiro lugar, ainda é uma técnica de reabilitação amplamente utilizada em obras de pequeno e médio porte no Brasil. Em segundo lugar, foram identificados alguns problemas nesse método de reforço, assim, mostrando a necessidade de ser discutido mais a fundo sobre sua utilização.

O principal objetivo desse trabalho foi estudar a reabilitação de vigas de concreto armado por meio da adição de barras de aço e adesivo estrutural de base epóxi.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Características das vigas

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, das quais, quatro foram reforçadas e uma viga serviu de referência, ou seja, não recebeu nenhum tipo de reforço. Todas as vigas foram produzidas iguais dimensões: 80 cm de comprimento (sendo 60 cm o trecho bi-apoiado), 15 cm de altura e 10 cm de largura como apresentado na Figura 1.

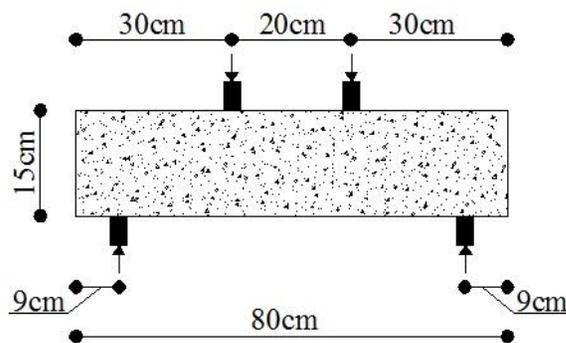


Figura 1. Dimensões das vigas da ensaiadas.

A viga E1 foi a de referência e não foi reforçada. As demais vigas (E2, E3, E4 e E5) foram reforçadas de diferentes maneiras. Todas as vigas receberam como armadura longitudinal duas barras com 6,3 mm de diâmetro e como armadura transversal doze estribos com 6,3 mm de diâmetro espaçados a cada 6,4cm. A Figura 2 apresenta o detalhamento das armaduras das cinco vigas.

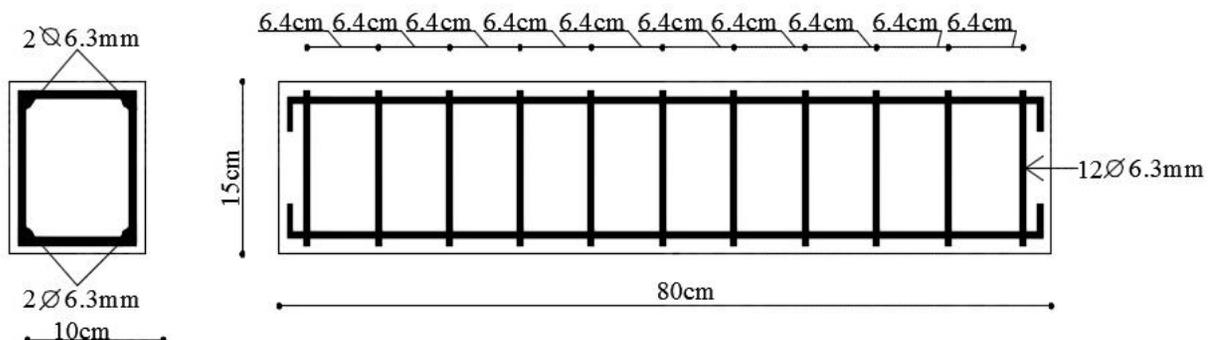


Figura 2. Detalhamento das armaduras das vigas.

A Viga E2 foi reforçada à flexão com a inserção de duas barras de ϕ 6,3 mm, com 50 cm de comprimento, em um “dente” moldado com adesivo epóxi (Figura 3).

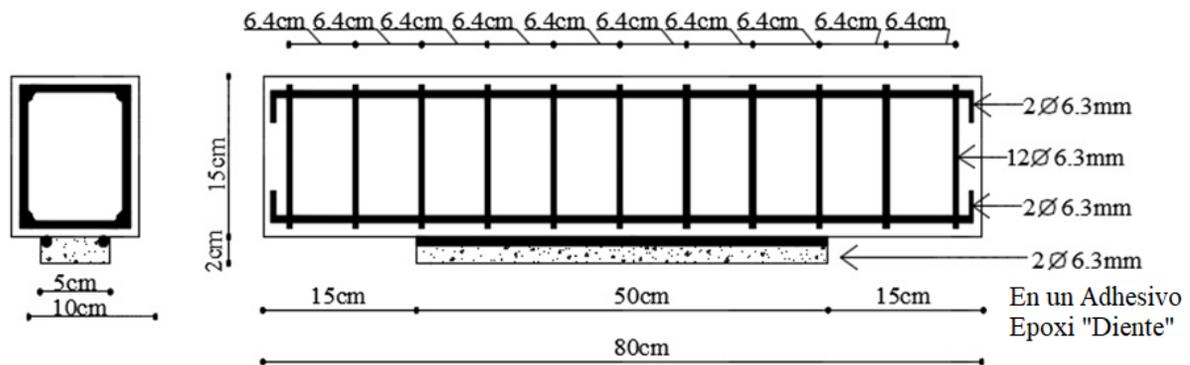


Figura 3. Detalhamento do reforço da Viga E2.

A Viga E3 também foi reforçada à flexão com a inserção de duas barras de ϕ 6,3 mm, com 50 cm de comprimento, em um “dente” moldado com adesivo epóxi. Para melhorar a ancoragem das barras de reforço ao substrato da viga, foram inseridos sete grampos em formato de “U” de 7 cm de altura e 4,5 cm de largura (conforme Figura 7), que penetraram 5,5 cm dentro da viga (Figura 4).

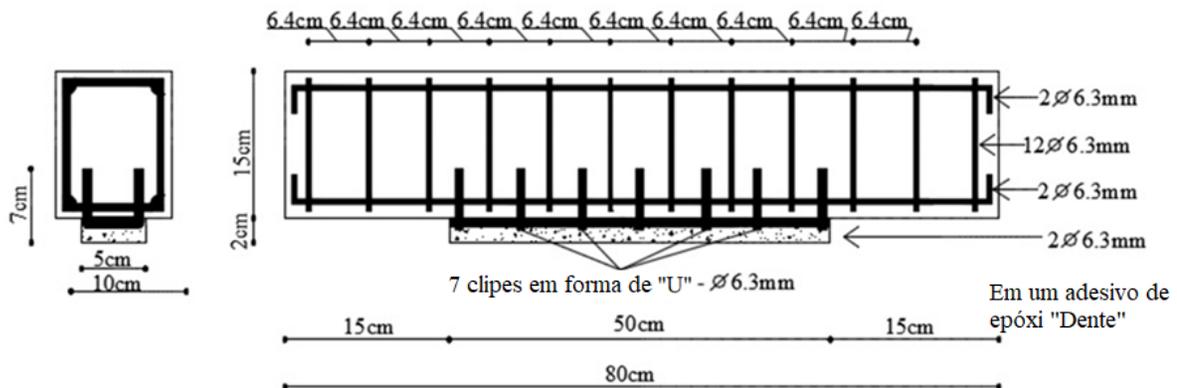


Figura 4. Detalhamento do reforço da Viga E3.

A Viga E4 foi reforçada à flexão com a inserção de duas barras de ϕ 6,3 mm, com 30 cm de comprimento, em um “dente” moldado com adesivo epóxi. Essas barras foram em tamanho reduzido para ficar quase que totalmente dentro da região de flexão pura (Figura 5).

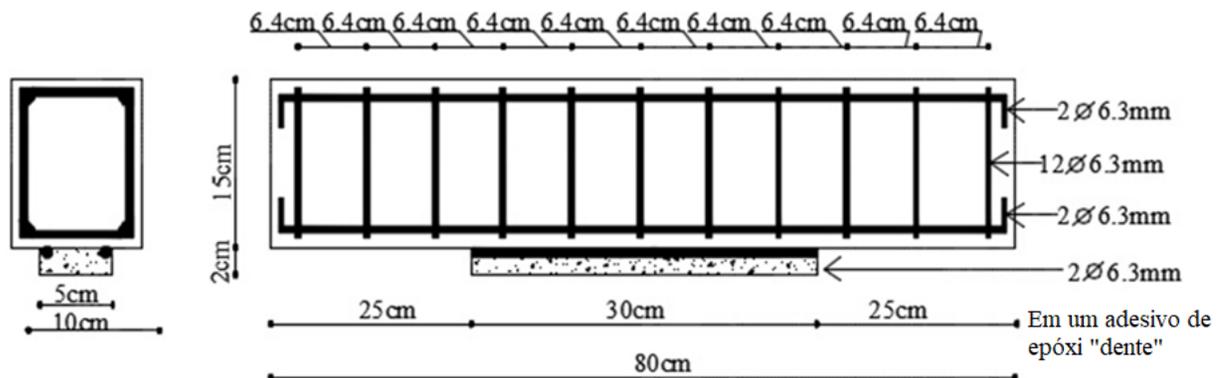


Figura 5. Detalhamento do reforço da Viga E4.

A Viga E5 também foi reforçada à flexão com a inserção de duas barras de ϕ 6,3 mm, com 30 cm de comprimento, em um “dente” moldado com adesivo epóxi. Como na Viga E4, essas barras foram em tamanho reduzido para ficar quase que totalmente dentro da região de flexão pura (Figura 6). Na Viga E5, para melhorar a ancoragem das barras de reforço ao substrato, foram inseridos quatro grampos em formato de “U” de 7 cm de altura e 4,5 cm de largura (conforme Figura 7), que penetraram 5,5 cm dentro da viga (Figura 6).

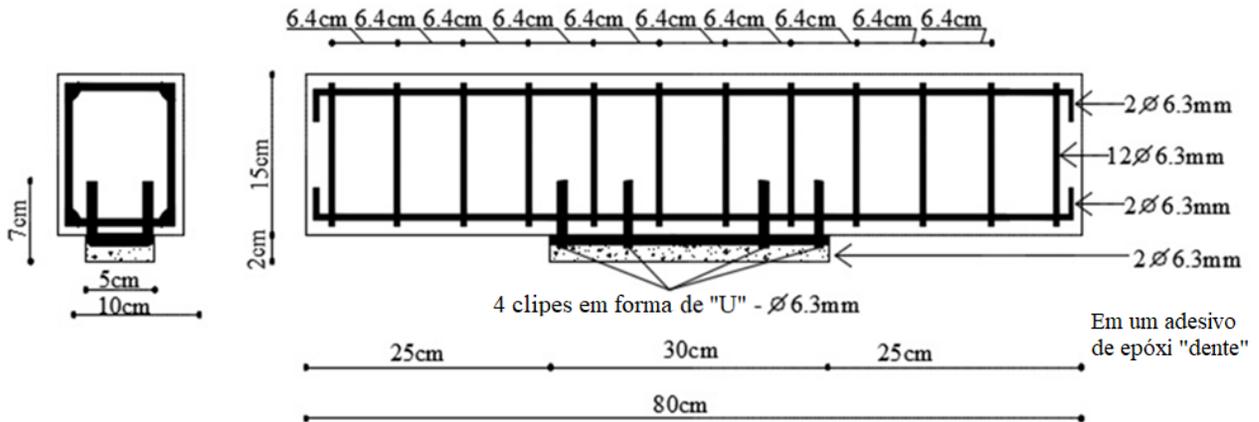


Figura 6. Detalhamento do reforço da Viga E5.

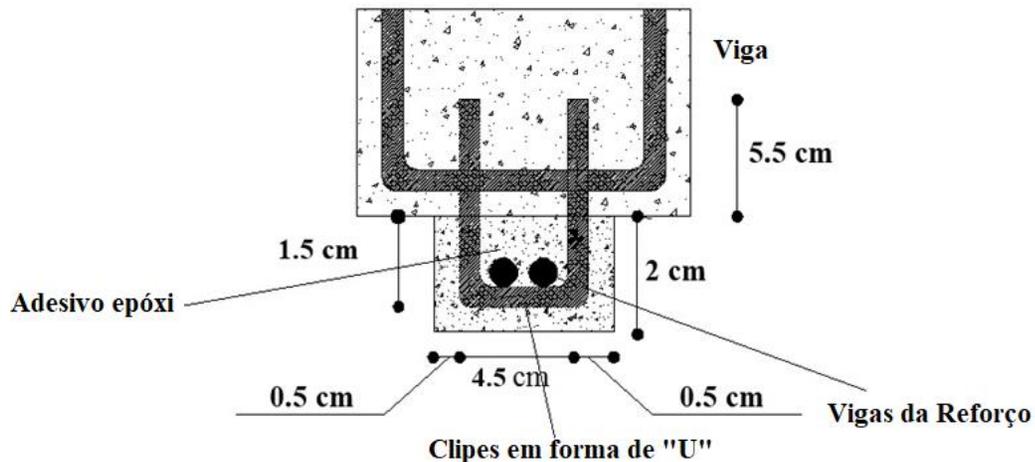


Figura 7. Detalhamento do grampo inserido nas vigas E3 e E5 para auxiliar na ancoragem entre o reforço e a peça.

A resistência à compressão do concreto (f_c) foi obtida através do ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos, no dia dos ensaios das vigas, e alcançou uma resistência média de 34,91 MPa. A resistência à compressão do concreto (f_c) foi obtida a partir do ensaio de compressão diametral de corpos de prova cilíndricos (Brazilian Test), no dia dos ensaios das vigas, e alcançou uma resistência média de 3,13 MPa. Os ensaios para obtenção da resistência a compressão e a tração do concreto foram feitos realizando as exigências da NBR 5739:2007 e da NBR 7222:2011. A Tabela 1 apresenta as características das vigas ensaiadas.

Tabela 1. Características das vigas ensaiadas.

Vigas	Reforço	Armadura Positiva	Estribos	f_y (MPa)	E_s (GPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E_{cs} (MPa)
E1	Sem reforço	2 ϕ 6.3 mm	12 ϕ 6.3 mm	500	210	34.91	3.20	29357.64
E2	2 ϕ 6.3 mm Comprimento = 50 cm							
E3	2 ϕ 6.3 mm + 7U Comprimento = 50 cm							
E4	2 ϕ 6.3 mm Comprimento = 30 cm							
E5	2 ϕ 6.3 mm + 3U Comprimento = 30 cm							
f_y = Limite de escoamento do aço segundo fabricante; E_s = Módulo de elasticidade do aço segundo fabricante; f_c = Resistência média à compressão do concreto na data do ensaio; f_t = Resistência média à tração do concreto na data do ensaio; E_{cs} = Módulo de elasticidade secante do concreto calculado pela NBR6118:2014 (ABNT – NBR6118, 2014).								

Apesar do fato das vigas analisadas terem dimensões reduzidas em relação as vigas reais, é necessário enfatizar que não foi o objetivo deste trabalho determinar qualquer correlação entre o modelo reduzido e um protótipo, através da análise dimensional e Leis de similaridade, em uma análise quantitativa. O objetivo foi sempre comparar o comportamento estrutural das vigas reforçadas (E2, E3, E4 e E5) com o da viga de referência (E1) que não recebeu reforço em uma análise qualitativa.

2.2 Sistema de Ensaio

As vigas da pesquisa passaram por ensaios experimentais realizados no Laboratório de Materiais da Universidade Estadual Vale do Acaraú e foram submetidas ao ensaio de Stuttgart, que consta na aplicação de duas forças concentradas, equidistantes dos apoios, possibilitando estudar o reforço em regiões submetidas à flexão pura e em regiões onde também há esforços de cisalhamento (flexão simples). A Figura 8 ilustra a prensa hidráulica utilizada para os ensaios.

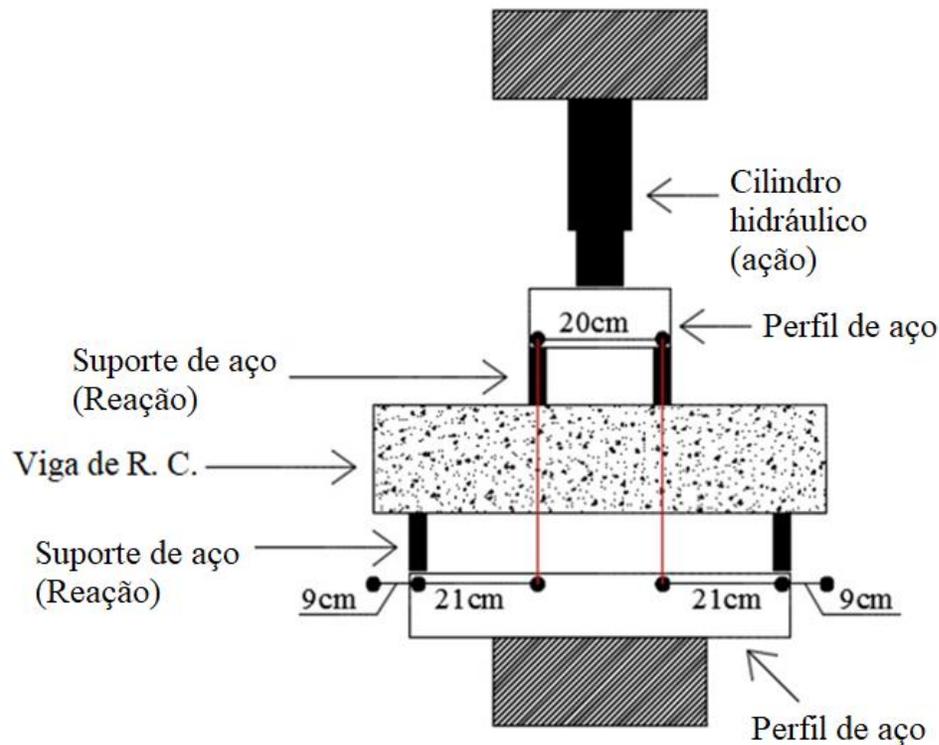


Figura 8. Detalhes da prensa utilizada com viga em ensaio de Stuttgart.

Os ensaios experimentais foram divididos em duas etapas, na primeira etapa as vigas E2, E3, E4 e E5 foram submetidas a uma carga de fissuração de 50kN, que é equivalente a 60% a 80% da carga de ruína. Essa primeira etapa tem o propósito de fissurar as vigas para simular a necessidade de reforço. Após a retirada da carga de 50kN, as vigas foram reabilitadas com barras de aço e adesivo epóxi. O adesivo epóxi utilizado para auxiliar a ancorar as barras de reforço ao substrato da viga foi o Sikadur 31. A resistência à compressão do Sikadur 31 aos 3 dias de idade é de 60 MPa, segundo o fabricante, Sika (2015).

Uma semana após a aplicação do reforço, iniciou-se a segunda etapa dos ensaios experimentais, que consistiu na aplicação de cargas nas vigas pelo ensaio de Stuttgart. O processo foi feito com aplicação de passos de carga a cada 10 kN até a viga chegar a ruína. A cada intervalo de carga aplicado sobre a viga foram procuradas fissuras e marcadas na mesma com um pincel, esse procedimento serve para auxiliar na identificação do modo de ruptura da viga posteriormente.

2.3 Processo computacional

As vigas confeccionadas para os ensaios experimentais também foram concebidas no programa Ansys, que utiliza método dos elementos finitos para discretização de estruturas. A modelagem computacional no software foi feita para representar as mesmas condições do ensaio de Stuttgart realizado em laboratório, também foram consideradas as mesmas características dos materiais utilizados, a fim de se obter resultados coerentes que sirvam para serem correlacionados com os resultados da análise experimental. Na Figura 9 é ilustrado a modelagem dos estribos da viga E1, bem como das outras quatro vigas, pois receberam a mesma armadura transversal, constando o espaçamento entre cada um deles e também as reações de apoio.

Os apoios e pontos de aplicação de carga foram modelados com 20 mm de largura, ao invés de 10 mm como nos ensaios, para que não houvesse concentrações de tensões nessas regiões, o que prejudicaria a convergência numérica e poderia resultar em uma ruptura precoce.

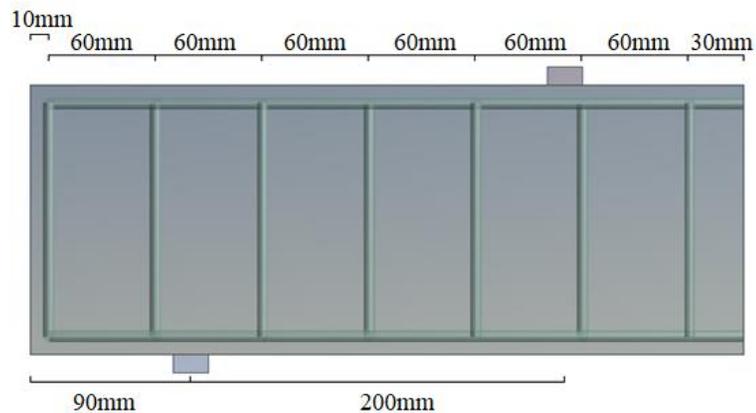


Figura 9: Modelagem da armadura transversal (estribos) da viga E1.

Para validar os resultados fornecidos pelo programa Ansys com a literatura e estudar a influência da discretização na precisão dos resultados, as vigas foram modeladas considerando as propriedades individuais dos materiais aço e concreto, como módulo de elasticidade, e coeficiente de Poisson e interações entre os dois materiais, como mostrado na tabela 2.

Tabela 2. Propriedades dos materiais.

Características	Concreto	Aço (CA-50)	Adesivo Epóxi (Sikadur 31)
Módulo de elasticidade	26838 MPa ⁽¹⁾	210 GPa ⁽²⁾	4.3 GPa ⁽³⁾
Coefficiente de Poisson	0.2 ⁽⁴⁾	0.3 ⁽⁵⁾	0.2 ⁽⁵⁾

⁽¹⁾ Módulo de elasticidade secante do concreto calculado pela NBR6118 (ABNT - NBR6118, 2014);
⁽²⁾ Módulo de elasticidade do aço de acordo com o fabricante;
⁽³⁾ Módulo de elasticidade do adesivo epóxi de acordo com o fabricante;
⁽⁴⁾ Coeficiente de Poisson adotado;
⁽⁵⁾ Coeficiente de Poisson de acordo com o fabricante.

O elemento tridimensional Solid65 de oito nós pode ser usado para representar materiais quebradiços como o concreto. Este sólido possui três graus de liberdade em cada nó, e é capaz de fissurar sob tração e esmagar sob compressão, possuindo como critérios de falha tensão limite para esmagamento (f_{ck}) e tensão limite para tração (f_t), o elemento é ilustrado na Figura 10.

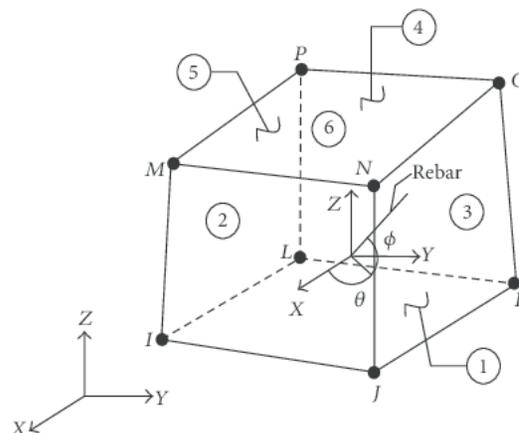


Figure 10. Geometria do elemento Solid65 (Ansys, 2013)

O elemento tridimensional Link180 foi utilizado para modelagem das armaduras. Este elemento apresenta dois nós com três graus de liberdade em cada nó, sendo amplamente utilizado para representar barras, treliças e cabos de maneira simplificada. O elemento pode sofrer alterações em sua seção transversal de acordo com a força axial a que está submetido, tendo sua área aumentada à medida em que é comprimido e reduzida à medida em que é tracionado, podendo-se assumir um critério de falha por deformação plástica da armadura, no caso dos modelos de concreto armado.

O elemento superficial Shell181 foi usado para modelar as barras de reforço e o adesivo epóxi. Este tipo de elemento é utilizado principalmente para modelagem de reforços com fibras de carbono, mas também pode ser utilizado para peças de aço. O elemento possui quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, possui capacidade de plasticidade e sua profundidade é considerada na análise.

Segundo Muliterno e Pravia (2016), na análise não-linear, o carregamento é dividido em uma série de incrementos (*substeps*), de modo que a cada incremento a matriz de rigidez é atualizada para refletir as alterações não-lineares na rigidez estrutural antes de prosseguir para o próximo. Nesta análise foram utilizados 500 incrementos, e a carga foi aplicada de baixo para cima em um único passo (*step*). Foi utilizada uma malha de elementos finitos de 10 mm. O tipo de convergência foi controlado pelo programa. A carga foi aplicada até ocorrer um erro de magnitude, que foi considerado como sendo o momento da ruptura. Os apoios foram inseridos nas duas faces superiores dos elementos de reação, localizadas entre estes e a viga, e foram definidos como sendo deslocamentos X, Y e Z nulos nessas faces. Foi executado o comando CEINTF para combinar os nós da viga e da armadura, considerando-se uma aderência perfeita entre esses os dois materiais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Cargas e modos de ruína

Após uma verificação visual das condições das vigas após a ruína, correlacionou-se cada viga ensaiada com o modelo computacional e comparou-se com a viga de referência.

Após todas as vigas terem atingido sua carga de ruptura, foi realizada uma comparação entre as vigas reabilitadas e a viga de referência, analisando as cargas de ruína e os mecanismos de ruptura. Observou-se também, entre as vigas reforçadas, qual o método de reforço mais eficiente. A Tabela 3 mostra os detalhes dos reforços, a carga de ruptura e o modo de ruptura de cada uma das vigas.

Tabela 3 - Descrição dos reforços, cargas e modos de ruptura das Vigas.

Viga	Reforço	V _{Ans} (kN)	V _{Exper} (kN)	V _{Exper} / V _{Ans}	Modo de Ruína
E1	Sem Reforço	85	80	0,94	Flexão
E2	2 ϕ 6,3 mm (comprimento = 50 cm) em “dente” com adesivo epóxi	89,75	108	1,20	Flexão
E3	2 ϕ 6,3 mm (comprimento = 50 cm) em “dente” com adesivo epóxi e 7 grampos em “U”	87,75	96	1,09	Compressão Diagonal
E4	2 ϕ 6,3 mm (comprimento = 30 cm) em “dente” com adesivo epóxi	90	116	1,29	Flexão
E5	2 ϕ 6,3 mm (comprimento = 30 cm) em “dente” com adesivo epóxi e 4 grampos em “U”	80	74	0,93	Flexão

V_{Ans} = Carga de ruína computacional indicada pelo programa Ansys;
V_{Exper} = Carga de ruína experimental.

3.2 Influência do modo de sollicitação

Quando submetida à segunda etapa dos ensaios, a viga E2 ao atingir sua carga de ruína (108kN), observou-se que a mesma chegou a romper após o reforço ter se descolado da peça, devido a esse desprendimento, a mesma rompeu por flexão. Comparando-a com a viga de referência (E1), verificou-se que a mesma teve um aumento de 35% em sua resistência.

Analisando os resultados de ensaio da viga E3, observou-se que ocorreu o mesmo a viga E2, a peça rompeu após o reforço ter sido descolado do substrato da viga, no entanto a mesma teve um modo de ruptura diferente, ela rompeu por compressão diagonal, ou seja, esmagamento da biela. Quando comparada a viga de referência, notou-se que a viga E3 teve um aumento de 20% em sua resistência mecânica.

Feita a análise dos resultados da viga E4, verifica-se o mesmo acontecido às vigas E2 e E3, a mesma rompeu por flexão após o reforço ter se desprendido da peça. Apesar do que, houve um início de esmagamento da biela, porém a viga chegou a ruína por flexão. A mesma obteve um aumento em sua resistência de 45% em relação à viga de referência.

Ao atingir a carga de ruína, a viga E5 teve o mesmo modo de ruptura das vigas E2 e E4, por flexão, após o reforço se descolar da peça. Comparando-a com a viga referência, ela obteve resistência inferior 7,85%. Na Figura 11 é apresentada as vigas ensaiadas após sua ruptura.

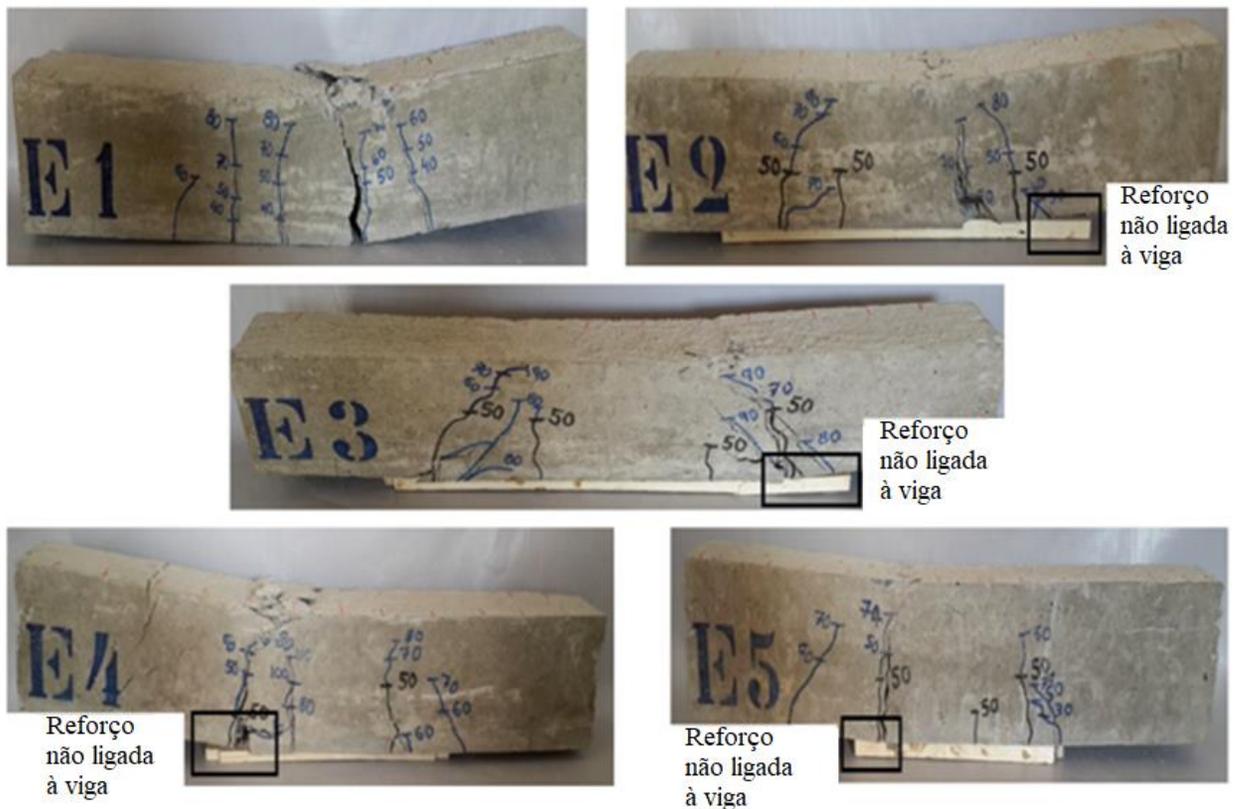


Figura 11. Vigas E1, E2, E3, E4 e E5 após ruptura.

Através da análise dos resultados obtidos no software Ansys, observou-se que a carga de ruína dada pelo programa foi bem aproximada aos resultados alcançados no ensaio experimental, bem como os modos de ruptura das vigas. No entanto, houve uma diferença no que se refere ao reforço, pois no ensaio experimental os reforços se descolaram da peça antes das mesmas chegarem a ruína, já na análise isso não ocorreu devido o atrito entre a viga e o reforço ter sido desconsiderado. A Figura 12 apresenta o gráfico da relação carga x flecha das cinco vigas obtidos na análise computacional.

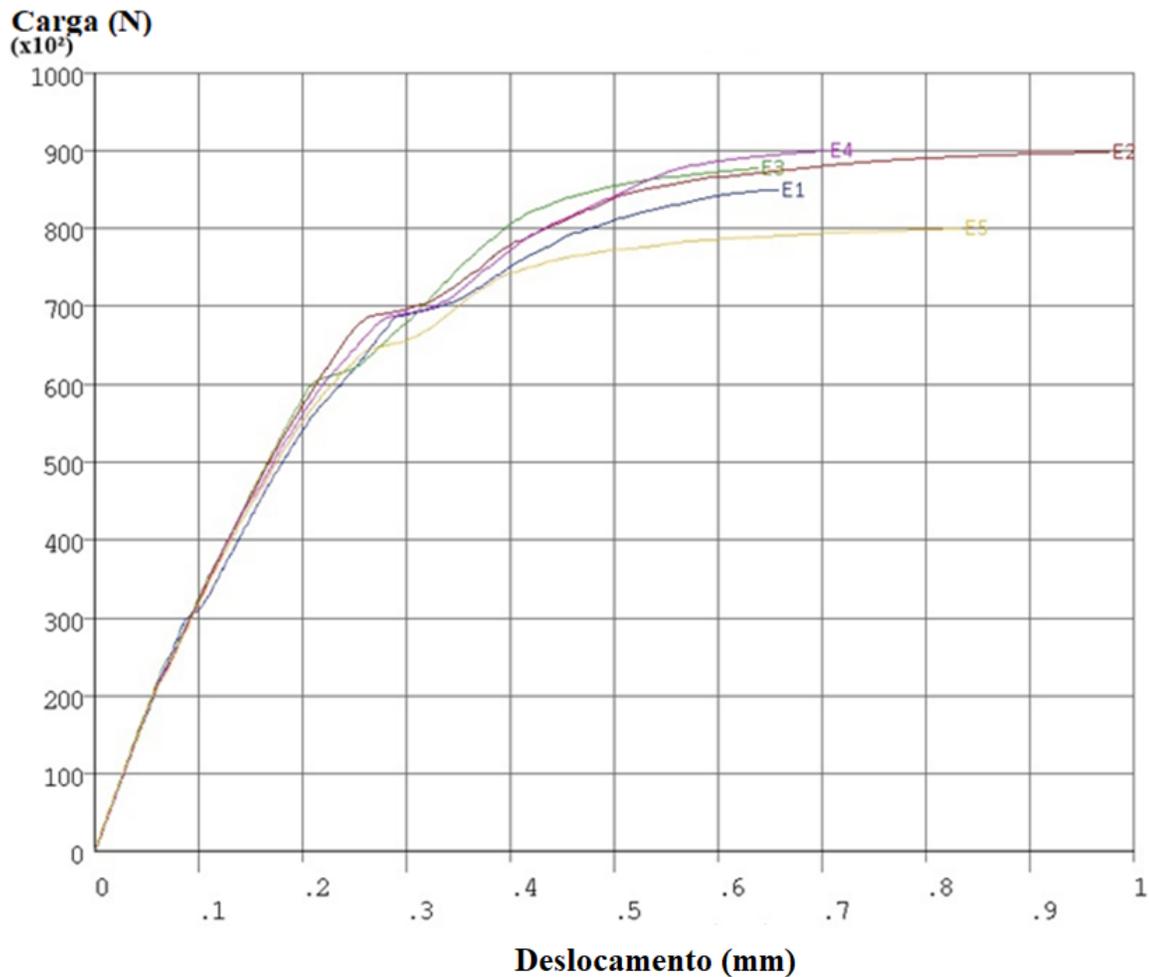


Figura 12. Gráfico carga x flecha de todas as vigas na mesma escala.

Dahmani, Khennane e Kaci (2010) destacam a simbologia do Ansys para os tipos de ruína por flexão, por cisalhamento (tração diagonal) e por compressão. Essas simbologias são apresentadas na legenda da Figura 14. Além disso, Dahmani, Khennane e Kaci (2010) informam que dependendo do tipo de ruptura, esses símbolos também podem vir combinados. Vale destacar que esse tipo de ruína mostrada pelo Ansys se trata de ruína local, como por exemplo uma abertura de fissura, um esmagamento localizado, etc. Não se trata de uma ruptura da viga. A combinação dessas ruínas localizadas que caracterizam uma ruptura da peça como um todo.

O objetivo da análise numérica das vigas reforçadas foi mostrar a distribuição de tensão nas vigas após a inserção do reforço, para fornecer resultados e compará-los aos resultados experimentais.

A partir da análise da imagem gerada pelo Ansys (Figura 13), que mostra o aparecimento de fissuras no momento que antecede a ruína da viga, as fissuras surgiram exatamente onde foram colocados os cliques para o auxílio na ancoragem do reforço. Portanto, verifica-se que a região em que a peça é reforçada, o aparecimento de tensões de compressão é muito perceptível, especialmente quando o primeiro grampo é inserido na viga (esquerda para a direita). A partir da correlação com o ensaio experimental, pode ser visto que esta é a mesma região em que o concreto é esmagado (Figura 11), isto é, a região onde a peça chega a ruína.

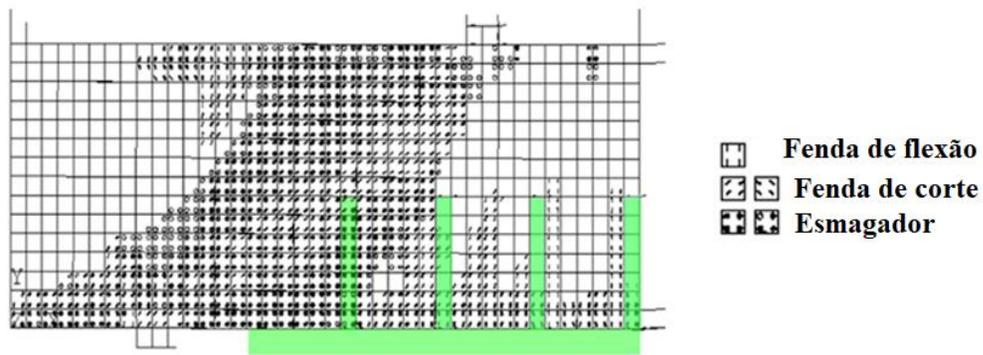


Figura 13. Padrão de fissuras gerado pelo ANSYS para a viga E3.

O uso dos grampos nos reforços das vigas, inicialmente pensado para melhorar a ancoragem, acabaram por gerar concentrações de tensões indesejáveis nas vigas. Analisando o problema através do Modelo de Bielas e Tirantes, observa-se o aparecimento de uma biela secundária do topo do grampo a base do estribo, sobrecarregando assim a biela já existente (Figura 14).

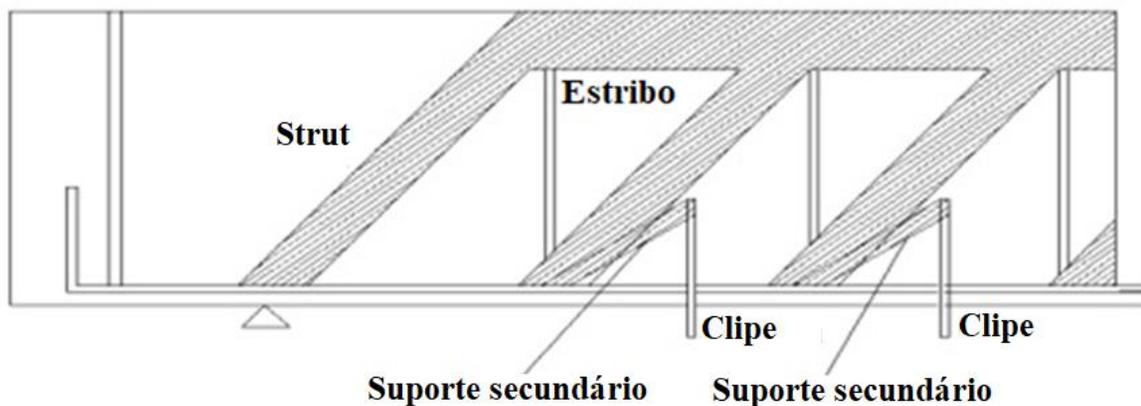


Figura 14. Modelo de Bielas e Tirantes para as vigas E3 e E5.

4. CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, observou-se que as vigas que receberam grampos para auxiliar na ancoragem entre a peça e o reforço (E3 e E5), mais precisamente a viga E3, que teve seu modo de ruptura por compressão diagonal, tal fato pode ser justificado devido ao aumento do campo de compressão na peça, causado pela adição dos grampos. No caso da viga E5, que rompeu com menor carga do que a viga de referência (E1) verificou-se que ao perfurar a viga para inserir os grampos criou-se uma concentração de tensões no furo, prejudicando a capacidade resistente da viga.

A viga E4 atingiu a maior carga de ruptura, comparando-a com a viga E2 que recebeu a mesma técnica de reforço, diferenciando-os apenas pelo seu comprimento, pode-se concluir que o reforço da viga E2 atuou na região de flexão simples até desprender-se da peça e a mesma chegar a ruína; o reforço da viga E4 atuou na região de flexão pura, justificando a carga de ruína maior em relação a viga E2 e todas as outras peças ensaiadas.

O resultado da análise numérica das vigas reforçadas teve como objetivo mostrar a distribuição das tensões nas vigas após a inserção dos reforços, afim de analisar comparativamente com os resultados reais e validá-los. Portanto, a análise computacional, feita através do Ansys, simulou satisfatoriamente os ensaios experimentais de maneira geral, inclusive justificando a ruptura por compressão diagonal da viga E3.

A análise das vigas reforçadas e de referência revelou que as vigas E2 e E4 estavam sob cargas finais maiores em comparação com as outras vigas. No entanto, pode-se concluir que, neste estudo, a adição dos cliques nas vigas E3 e E5 prejudicou sua capacidade resistente. Além disso, a falta de união da armadura, que ocorreu em todas as vigas reforçadas, ocorreu pelo fato da resina epóxi ter um módulo de elasticidade significativamente inferior ao dos demais materiais do sistema. Portanto, quando se aplicou carga a viga reforçada, devido à rigidez insuficiente, a resina não transferiu toda a tensão recebida da face inferior da peça. Isso levou ao deslocamento do reforço, o que indica que apenas o aço funciona. O cenário seria diferente se os materiais tivessem um módulo de elasticidade semelhante. Portanto, embora as vigas E2, E3 e E4 tenham cargas finais mais altas que as vigas de referência, esse tipo de sistema de reforço não funciona de maneira eficiente. Portanto, não é recomendado usar esse tipo de reforço porque é ineficaz e pode ser perigoso.

Vale ressaltar que as conclusões deste trabalho se limitam apenas aos resultados dos ensaios das cinco vigas aqui apresentadas. Outras pesquisas futuras, com mais ensaios de vigas, com e sem reforço, são necessários para uma melhor validação desta pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

- Alfaiate, J.; Costa, R. (2004). “*O reforço de vigas de betão armado com chapas metálicas coladas com resina*”. Métodos Computacionais em Engenharia, APMTAC, Portugal, pp 1-13. <http://hdl.handle.net/10400.1/1397>
- Altun, F. (2004) “*An experimental study of jacketed reinforced concrete beams under bending*”. Construction and Building Materials, 18 (8), pp. 611-618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.005>
- Ansys (2013). “*Ansys Mechanical APDL Technology Structural Analysis Guide*”. ANSYS Inc. Release 15.0, Southpointe, 498p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014). *NBR 6118: Projetos de Estruturas de Concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1994). *NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Cheong, H. K.; MacAlevey, N. (2000) “*Experimental behavior of jacketed reinforced concrete beams*”. Journal of Structural Engineering - ASCE, 126(6), pp. 692-699. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:6\(692\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:6(692))
- Dahmani, L.; Khennane, A.; Kaci, S. (2010) “*Crack identification in reinforced concrete beams using ANSYS software*”. Strength of Materials Journal, 42 (2). pp. 232-240.
- Deghenhard, C. C.; Teixeira, T.; Vargas, A.; Vito, M.; Piccinini, A. C.; Do Vale Silva, B. (2016). “*Análise experimental de distintas configurações de chapa metálica no reforço à flexão em vigas de concreto armado*”. Revista Alconpat, v. 6, nº 2, pp 190-201. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i2.138>
- Helene, P. R. L. (2000). “*Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto*”. 2ª ed, São Paulo: Editora Pini, 213 p.
- Lima, E. M. F. (2015) “*Estudo teórico-experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço em dentes de adesivo epóxi*”. Sobral. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA).
- Muliterno, B. K.; Pravia, Z. M. C. (2016) “*Modelo para vigas de concreto armado*”. Técnica: Revista de Tecnologia da Construção (São Paulo), v. 231, pp. 22-25.

- Reis, A. P. A. (1998). “*Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho*”. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- Reis, A. P. A. (2003). “*Reforço de vigas de concreto armado submetidas a pré-carregamento e ações de longa duração com aplicação de concretos de alta resistência e concretos com fibras de aço*”. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- Santos, E. W. F. (2006). “*Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial*”. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) - Coppe - UFRJ.
- Sika (2015). “*Manual Técnico – Produtos Sika*”. Osasco: Sika, 671 p.