

# ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADAS AO CISALHAMENTO COM CHAPA DE AÇO

Marília Marcon Bez Batti (1); Bruno do Vale Silva (2).

LEE- Laboratório Experimental de Estruturas  
UNESC - Universidade do Extremo Sul Catarinense  
(1) Orientando; e-mail: mariliabebatti@hotmail.com,  
(2) Orientador; e-mail: dovalessilva@unesc.net

## RESUMO

Em algumas situações, precisa-se reforçar ou reabilitar a estrutura em curto prazo, mas para isso é necessário uma análise crítica das causas para então poder definir qual melhor técnica a ser empregada. Conforme define Ferrari et al (2002) *apud* Pimenta (2012, p. 12), utiliza-se o reforço estrutural para aumentar a capacidade do elemento estrutural resistir a um esforço, que em função das “falhas de concepção ou execução de projeto, alteração da função da edificação, desgaste natural, surgimento de patologias, variações térmicas no concreto, falta de manutenção, entre outros motivos, não atendem mais as suas condições originais ou novas necessidades da estrutura”. O presente estudo tem como objetivo avaliar o comportamento do reforço com chapas de aço SAE 1020 com espessura de 0,75 mm coladas com adesivo estrutural a base de epóxi aplicadas na área cisalhante de vigas de concreto armado, antes e após serem levadas a carga de ruptura. Com os resultados dos ensaios pode-se concluir a eficácia dos reforços aplicados nas vigas sãs, aumentando sua capacidade portante em até 50%, e na viga reforçada após ser rompida em que a fissura foi restaurada com adesivo estrutural a base de epóxi, aumentando a sua capacidade portante em 49,2%. O reforço não se mostrou eficiente nas vigas reforçadas após serem rompidas, em que a fissura foi restaurada com argamassa, diminuindo sua capacidade portante em 58,7%.

*Palavras-Chave: Concreto, chapas de aço, reforço, cisalhamento.*

## 1. INTRODUÇÃO

Desde tempos muito antigos, o homem se preocupa em adaptar suas edificações para que atendam às suas necessidades. Nos dias atuais com o desenvolvimento de novas tecnologias no ramo da construção civil, edificações com vãos maiores, maior velocidade na construção, mão de obra pouco qualificada, algumas das maiores preocupações são na concepção, no cálculo, na análise ou no detalhamento das estruturas. Há um crescimento rápido, surgem inovações, aumentando assim os riscos.

As construções apresentam várias limitações quanto ao desenvolvimento científico aplicado e ao controle tecnológico utilizado, as falhas em algumas estruturas podem levar a desempenhos insatisfatórios. Segundo Souza e Ripper. (1998, p.13), este conjunto de fatores é chamado de deterioração estrutural.

“As causas da deterioração podem ser mais diversas, desde o envelhecimento "natural" da estrutura até os acidentes, e até mesmo a irresponsabilidade de alguns profissionais que optam pela utilização de materiais fora das especificações, na maioria das vezes por alegadas razões econômicas. A soma de tantos fatores pode levar a que se considere estar-se a viver uma época de grandes preocupações, pois embora se possa argumentar com a tese de que tais problemas tenham nascido com o próprio ato de construir, é certo que nas primeiras construções tais questões não se revestiam de caráter sistemático, ficando restritas a alguns poucos problemas ocasionais. (Souza e Ripper, 1998 apud Deghenhard4, 2013, p.13).

Na engenharia há um ramo relativamente novo chamado de patologia das construções, este responsável pelo “estudo das origens, manifestações, consequências e ocorrência de falhas e dos sistemas de degradação das estruturas” (Souza; Ripper, 1998, p. 14).

Em algumas situações, precisa-se reforçar ou reabilitar a estrutura em curto prazo, mas para isso é necessário uma análise crítica das causas para então poder definir qual melhor técnica a ser empregada. Conforme define Ferrari et al (2002) *apud* Pimenta (2012, p. 12), utiliza-se o reforço estrutural para aumentar a capacidade do elemento estrutural resistir a um esforço, que em função das “falhas de concepção ou execução de projeto, alteração da função da edificação, desgaste natural, surgimento de patologias, variações térmicas no concreto, falta de manutenção, entre outros motivos, não atendem mais as suas condições originais ou novas necessidades da estrutura”.

Na década de 60, iniciaram-se as pesquisas sobre reforço estrutural de vigas de concreto armado utilizando chapas de aço coladas com resina epóxi, baseando-se nas propriedades resistentes do aço e na aderência conferida pelas resinas do tipo epoxídicas. Quando aplicado em condições normais, este tipo de reforço tem um custo relativamente baixo e demonstra grande eficiência. No entanto há algumas desvantagens como a baixa resistência ao fogo da resina, peso elevado das chapas de aço e a possibilidade de corrosão do aço.

Existem diversas técnicas para reforço estrutural, este estudo é baseado no estudo desenvolvido por Almeida et al. (2012), onde se utilizou elementos compósitos com fibras de vidro como reforço ao cisalhamento em vigas de concreto.

O objetivo deste estudo é através de análises experimentais, analisar a capacidade de carga de vigas sãs e vigas após serem levadas a sua carga de ruptura. Com aplicação de reforço com chapas de aço SAE 1020, com espessura de 0,75 mm, aplicadas com adesivo estrutural a base de epóxi, na face cisalhada com a função de estabilizar ou aumentar a resistência ao cisalhamento da viga.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O planejamento experimental do presente trabalho foi dividido em duas fases. A primeira fase corresponde a um ensaio piloto de flexão a quatro pontos com duas vigas. Sendo que uma viga contém três estribos, com espaçamento de 90 centímetros entre eles, e a outra viga contém seis estribos, com espaçamento de 30 centímetros entre eles. Com o objetivo de avaliar o comportamento em relação ao cisalhamento, evitando imprevistos nas próximas etapas.

A segunda fase seguiu com a fabricação de cinco vigas padrão, contendo 06 estribos em cada uma, com espaçamento de 30 cm. Duas vigas foram utilizadas como referência, levadas ao rompimento total para verificação da carga máxima, deslocamentos verticais e fissuração. Essas duas vigas mais a piloto (rompida na fase anterior do trabalho) tiveram suas fissuras preenchidas, sendo duas com argamassa colante e a outra com resina epóxi, após foram reforçadas com chapas de aço conforme os procedimentos descritos a seguir.

As demais vigas (que não foram submetidas ao ensaio), foram reforçadas na área de cisalhamento com chapa de aço SAE 1020 com espessura de 0,75 mm coladas com resina epóxi.

Paralelos aos ensaios de cisalhamento foram moldados quatorze corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing 10 \times 20$  cm), conforme especificações na norma ABNT NBR 5738:2003 e ABNT NBR 5739:2007, com o objetivo de obter a resistência à compressão axial do concreto aos 7 dias, aos 14 dias, aos 28 dias na data do ensaio das vigas referência e aos 35 dias na data do ensaio das vigas reforçadas com chapas de aço SAE 1020, sendo complementados aos 28 dias com os ensaios de compressão diametral e

módulo de elasticidade de acordo com a ABNT NBR 7222:2011 e ABNT NBR 8522:2008, respectivamente. Lembrando que, os ensaios de caracterização do concreto foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC e os ensaios deflexão à quatro pontos nas vigas foram realizados no Laboratório Experimental de Estruturas – LEE, localizados no Iparque – UNESC.

## 2.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS UTILIZADOS E FABRICAÇÃO DAS VIGAS

As vigas foram fabricadas com seções transversais de 12x20 cm e 190 cm de comprimento. Considerando a resistência característica do concreto de 25 MPa, aço com nervura CA-50 e seguindo os critérios da ABNT NBR 6118:2014, adotou-se duas barras de aço com 10 mm de diâmetro para armadura de flexão, totalizando uma área de aço de 1,6 cm<sup>2</sup>.

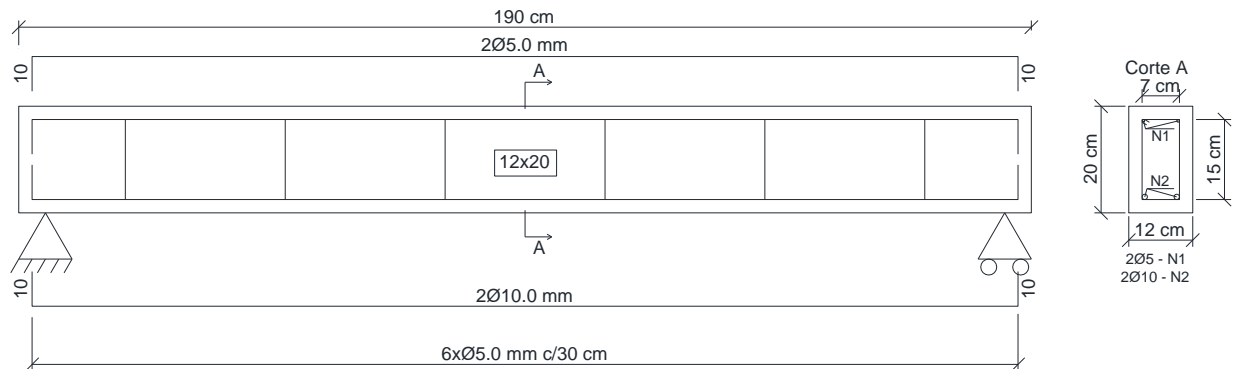
Para os estribos foram utilizadas barras de aço com 5 mm de diâmetro a cada 30 centímetros, totalizando seis estribos. Não obedecendo os critérios da ABNT NBR 6118:2014, para provocar a ruptura por cisalhamento. A Figura 1 apresenta as formas e a armadura prontas para concretagem. A Figura 2 mostra o detalhamento das armaduras nas vigas

Figura 1: Foto das formas e armadura prontas para concretagem



Fonte: Autor, 2015

Figura 2: Detalhamento da armadura nas vigas



Fonte: Autor, 2015

A caracterização do concreto fresco foi feita por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump-test*) como resultado de 11 cm, seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118:2014 que exige o resultado de 10 cm  $\pm$  2 cm. Foram moldados quatorze corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing$ 10x20 cm), para o controle da resistência do concreto à compressão axial, módulo de elasticidade e compressão diametral, como mostra a Figura 3.

Figura 3: Moldes dos corpos de prova para ensaio de compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade prontos para concretagem.



Fonte: Autor, 2015

Nesta mesma data foram concretadas cinco vigas com concreto usinado C25. Para garantir o cobrimento da armadura longitudinal de 2,5 cm foi utilizado espaçadores plásticos e o concreto foi adensado com o auxílio de vibradores de imersão. A concretagem foi realizada na Concretar Concreto Usinado, localizada na BR 101, nº 1025, km 422, bairro Sanga da Areia em Araranguá/SC. A Figura 4 mostra as vigas após serem concretadas.

Figura 4: Vigas após a concretagem



Fonte: Autor, 2015

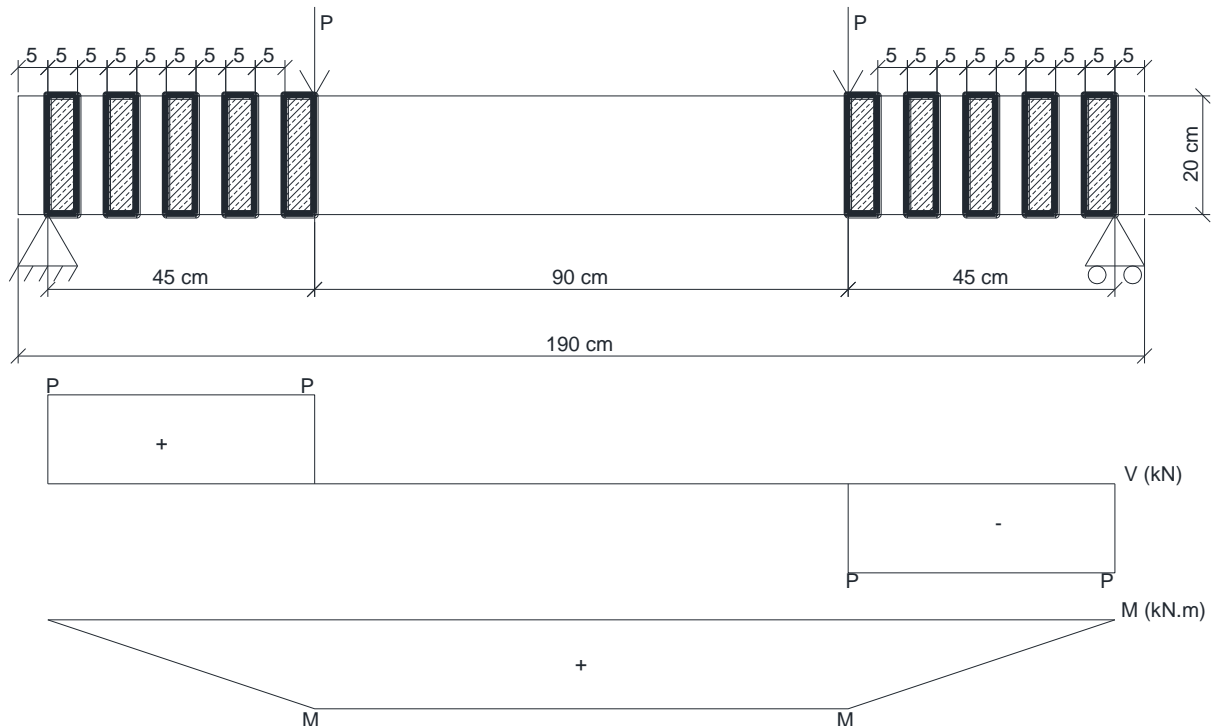
## **2.2 APLICAÇÃO DAS CHAPAS DE AÇO SAE 1020 COMO REFORÇOS AO CISALHAMENTO**

Após as vigas passarem pelo processo de cura durante os 28 dias, foram desformadas e levadas até o Laboratório Experimental de Estruturas – LEE da UNESC, onde foram iniciados os ensaios.

As chapas de aço SAE 1020 utilizadas para o reforço foram comercializadas e cortadas pela empresa Aislan Ferros Ltda, localizada na Rodovia SC 448, km 38, nº 680, bairro Centro em Turvo/SC, e padronizadas para todas as vigas. Foram utilizadas 20 chapas de aço SAE 1020 com espessura de 0,75 mm em cada viga, espaçamento de 05 cm entre elas, e largura e comprimento de 5x20 cm respectivamente. E aplicadas nas duas faces da viga, na área cisalhante, como mostra a Figura 5, juntamente com o esquema do diagrama de esforço cortante e momento fletor, justificando assim a aplicação do reforço nesta área.



Figura 5: Esquema da aplicação das chapas de aço na viga, diagrama de esforço cortante e momento fletor.



Fonte: Autor, 2015

Foi utilizado o adesivo estrutural EP, que consiste em um bi componente a base de epóxi da marca Bautech®, material pré-dosado, com características de alta adesividade, resistência mecânica e química, impermeável à água e óleo, além da cura total em 07 dias e a dureza inicial em 12 horas. A aplicação do adesivo estrutural seguiu as recomendações do fabricante, o qual especifica que a superfície deve estar isenta de pó, desmoldantes ou qualquer substância que prejudique a aderência entre a chapa de aço e a área a ser colada. A limpeza foi realizada com o auxílio de uma escova de aço. Após ocorreu a homogeneização do adesivo estrutural, que contém dois componentes que precisam ser unidos e misturados por 5 minutos, conforme recomendação do fabricante. Foram realizadas ranhuras nas chapas de aço e na viga de concreto com o auxílio de uma lixa N50 antes da colagem, para melhorar a aderência. O adesivo estrutural a base de epóxi foi aplicado com a espessura máxima de 2,0 mm e com auxílio de espátulas. A Figura 6 mostra a aplicação do adesivo estrutural nas chapas de aço, a colagem das chapas de aço e a viga de concreto logo após a sua aplicação.

Figura 6: a) Aplicação do adesivo estrutural na chapa de aço SAE 1020, com espessura de 0,75 mm. b) Aplicação do adesivo estrutural na viga de concreto armado. c) Viga após a aplicação das chapas de aço.



Fonte: Autor, 2015

Após a aplicação das chapas de aço, submeteu-se uma leve pressão para que fosse eliminado o excesso de resina que porventura existisse, garantindo uma superfície lisa e uniforme. Para garantir a cura inicial foram colocados pesos, e estes foram mantidos durante 7 dias. O fabricante especifica que deve se manter a chapa de aço após ser colada sem movimentação por no mínimo 24 horas e que o carregamento só pode ser liberado após 7 dias. Este procedimento aconteceu aos 35 dias após a concretagem.

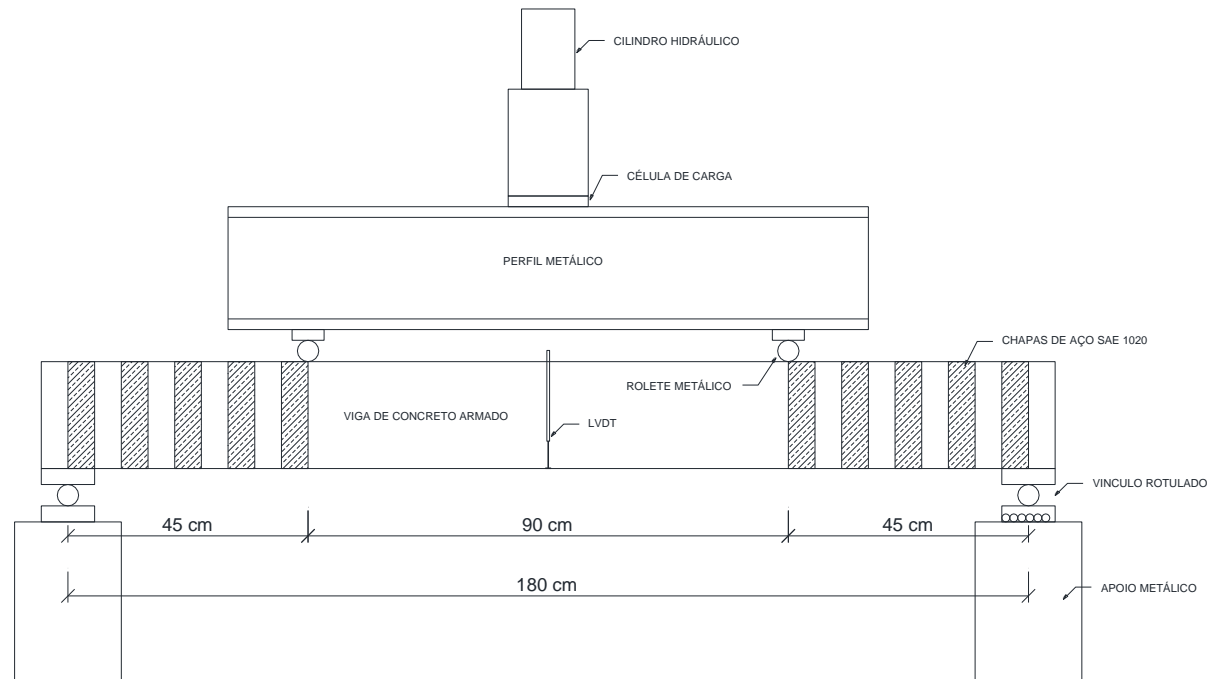
Para a realização do ensaio de flexão à quatro pontos, foi utilizado um pórtico de reação metálico, onde se localiza um cilindro hidráulico e uma célula de carga acoplada a sua base com capacidade de leitura máxima de 500 kN. E para medir a deflexão de cada viga foi utilizado um transdutor de deslocamento (LVDT) com leitura máxima de 100 mm, localizado no centro do vão da viga. Estes equipamentos estão ligados ao sistema de aquisição de dados Quantum X® que utiliza o *software* Catman Easy®, ambos da marca HBM®.

Neste ensaio a carga é aplicada em um cilindro hidráulico de cima para baixo sobre um perfil metálico, este carregamento é transferido para a viga em duas cargas



pontuais distantes 45 cm do centro do apoio, favorecendo o rompimento na área cisalhante. A Figura 7 mostra o esquema geral do ensaio.

Figura 7: Visão e esquema geral do ensaio.



Fonte: Autor, 2015

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL, MÓDULO DE ELASTICIDADE E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Paralelos aos ensaios de flexão das vigas foram realizados ensaios para controle, estes foram: ensaio de compressão axial aos 07 dias, 14 dias, 28 dias e 35 dias, ensaio de módulo de elasticidade e ensaio resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias. A Tabela 1 apresenta os resultados destes ensaios.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade e compressão diametral.

Idade dos corpos de prova (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Módulo de elasticidade à compressão (MPa)
7	15,9	-	-
7	16,5	-	-
7	15,1	-	-
<b>Média (D.P.)</b>	<b>15,8 (0,7)</b>		
14	19,3	-	-
14	19,7	-	-
14	18,7	-	-
<b>Média (D.P.)</b>	<b>19,2 (0,5)</b>		
28	22,9	3,03	35,5
28	25,3	2,87	36,7
28	23,9	3,02	34,8
<b>Média (D.P.)</b>	<b>24,0 (1,2)</b>	<b>2,97 (0,09)</b>	<b>35,7 (0,9)</b>
35	26,7	-	-
35	28,7	-	-
<b>Média (D.P.)</b>	<b>27,7 (1,4)</b>		

Fonte: Autor, 2015

### 3.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO A QUATRO PONTOS NAS VIGAS

Para cada tipo de viga ou reforço, foi utilizada uma nomenclatura para melhor entendimento. A Tabela 2 apresenta o resumo das nomenclaturas que serão utilizadas posteriormente.

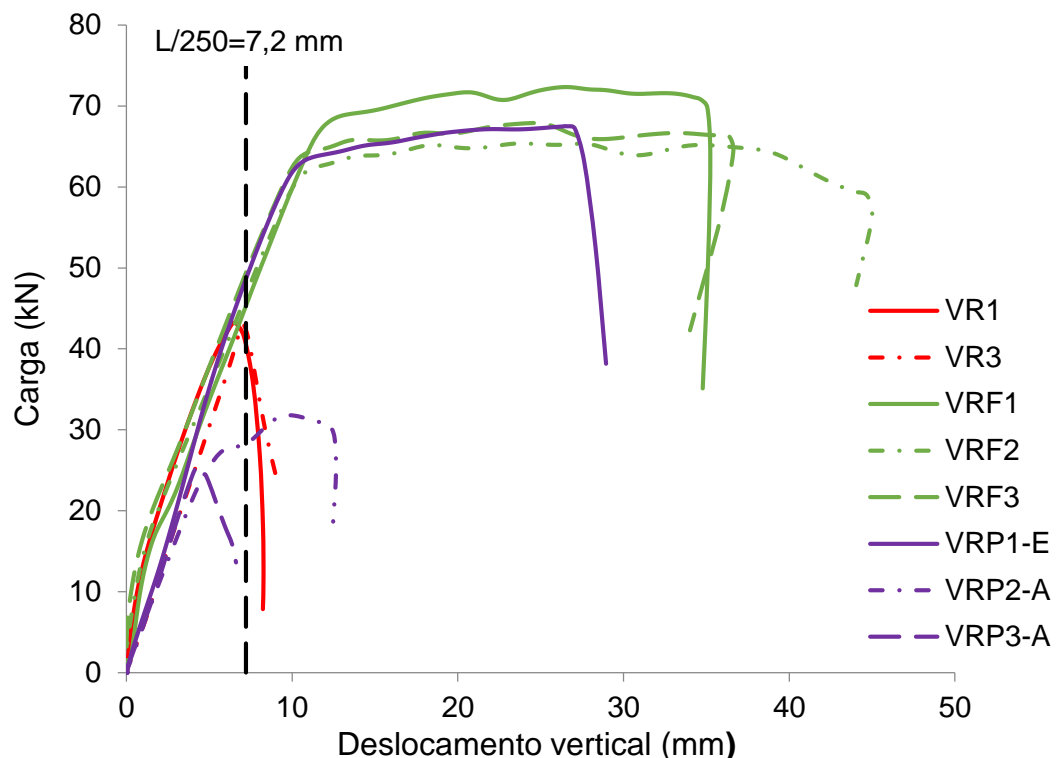
Tabela 2: Nomenclatura utilizada para cada tipo de viga.

Nomenclaturas	
VR	Viga referência
VRF	Viga sã reforçada
VRP-e	Viga reforçada após ser rompida (preenchimento da fissura com adesivo estrutural a base de epóxi)
VRP-a	Viga reforçada após ser rompida (preenchimento da fissura com argamassa ACIII)

Fonte: Autor, 2015

Após a colagem das chapas com o adesivo estrutural, foram realizados os ensaios para a verificação da resistência total à flexão e o comportamento do reforço. A partir dos ensaios de flexão à quatro pontos foram obtidos os resultados totais. A Figura 8 apresenta o gráfico com os resultados obtidos para as vigas referência, as vigas são reforçadas e as vigas rompidas e reforçadas.

Figura 8: Gráfico resistência total das vigas – Carga (kN) x Deslocamento (mm).



Fonte: Autor, 2015

Ao aplicar a carga até atingir a ruptura, foi obtido o deslocamento máximo fazendo um comparativo com o deslocamento máximo estabelecido pela norma, o qual especifica que este valor deve ser obtido a partir do seu comprimento dividido por 250 ( $L/250$ ).

As vigas de referência (VR) tiveram seu modo de ruptura por cisalhamento e a média da carga máxima na ruptura de 45,20 kN. As vigas são reforçadas tiveram seu modo de ruptura por flexão, mostrando que o reforço se comportou conforme o esperado, e obteve a média da carga máxima na ruptura de 67,83 kN, um aumento de 50% na resistência.

As vigas reforçadas depois de rompidas apresentaram quando submetidas novamente ao ensaio de flexão a quatro pontos fissuras de ruptura por cisalhamento

e distintas. Na VRP1-e abriu se uma nova fissura e suportou carga de 67,44 kN, um aumento de 49,20% em relação as vigas de referência. Porém as VRP2-a e VRP3-a apresentaram ruptura na mesma fissura aberta no primeiro ensaio e suportaram em média 28,58 kN, uma diminuição de 58,70% em relação as vigas referência. A Tabela 3 mostra a análise dos resultados de cada viga e seu deslocamento máximo, fazendo um comparativo com a carga obtida no deslocamento máximo especificado pela norma (L/250).

Tabela3: Resultados de cada viga, seu deslocamento máximo e a carga atuante no deslocamento máximo especificado pela norma.

	L/250 - Desl. = 7,2 mm		Ruptura	
	Carga (kN)	Condução de leitura	Carga (kN)	Deslocamento (mm)
VR1	41,5	Após a ruptura	43,2	6,5
VR2*	-	-	51,2	-
VR3	43,1	Antes da ruptura	41,2	7,4
<b>Média (D.P.)</b>	<b>42,3 (1,1)</b>	-	<b>45,2 (5,3)</b>	<b>6,9 (0,6)</b>
VRF1	45,5	Antes da ruptura	71,7	20,3
VRF2	46,7	Antes da ruptura	65,2	18,3
VRF3	50,3	Antes da ruptura	66,7	33,3
<b>Média (D.P.)</b>	<b>47,5 (2,5)</b>	-	<b>67,8 (3,4)</b>	<b>24,0 (8,1)</b>
VRP1-e	48,3	Antes da ruptura	67,4	26,2
VRP2-a	28,2	Antes da ruptura	31,8	9,8
VRP3-a	-	-	25,4	4,5
<b>Média (D.P.)</b>	<b>38,3 (14,2)</b>	-	<b>41,5 (22,7)</b>	<b>13,5 (11,3)</b>

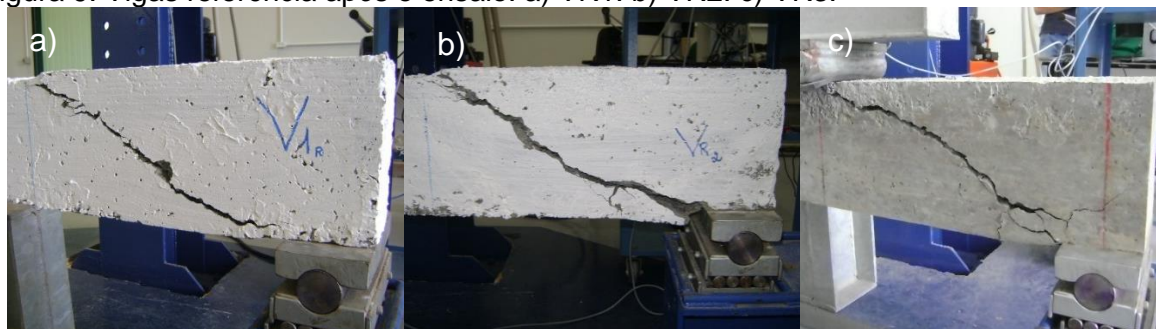
\* Na viga VR2 não foi possível realizar leituras de deslocamentos devido uma falha no equipamento de leitura.

Fonte: Autor, 2015

### 3.3 MODO DE RUPTURA

Cada grupo de vigas teve um comportamento distinto. As vigas referência obtiveram os valores de ruptura na área cisalhante, as vigas sãs reforçadas obtiveram seus valores de ruptura na área flexionada e as vigas reforçadas após ser rompidas obtiveram seus valores de ruptura na área cisalhante. A Figura 9 mostra as vigas referência após serem submetidas ao ensaio, a Figura 10, Figura 11 e Figura 12 mostram as vigas sãs reforçadas após o ensaio e a Figura 13 mostra as vigas reforçadas após serem rompidas após o ensaio.

Figura 9: Vigas referência após o ensaio: a) VR1. b) VR2. c) VR3.



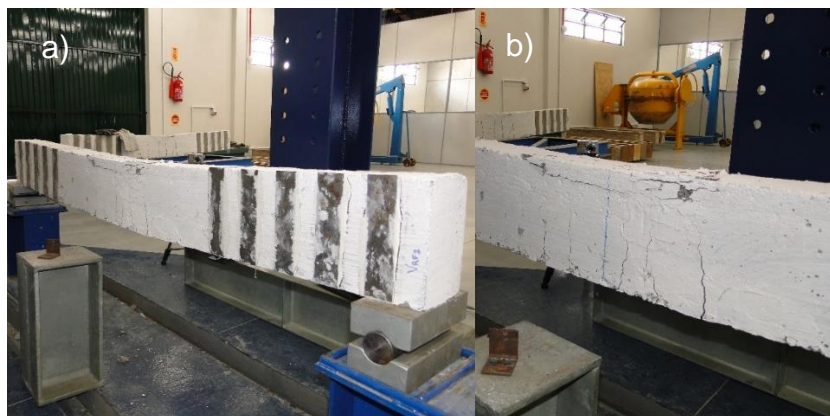
Fonte: Autor, 2015

Figura 10: Viga sã reforçada após o ensaio – VRF1. a) Visão geral da viga. b) Detalhe das fissuras.



Fonte: Autor, 2015

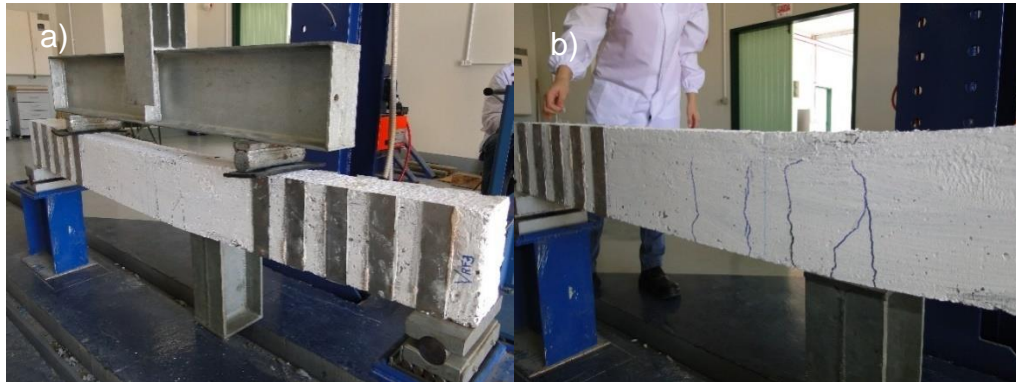
Figura 11: Viga sã reforçada após o ensaio – VRF2. a) Visão geral da viga. b) Detalhe das fissuras.



Fonte: Autor, 2015

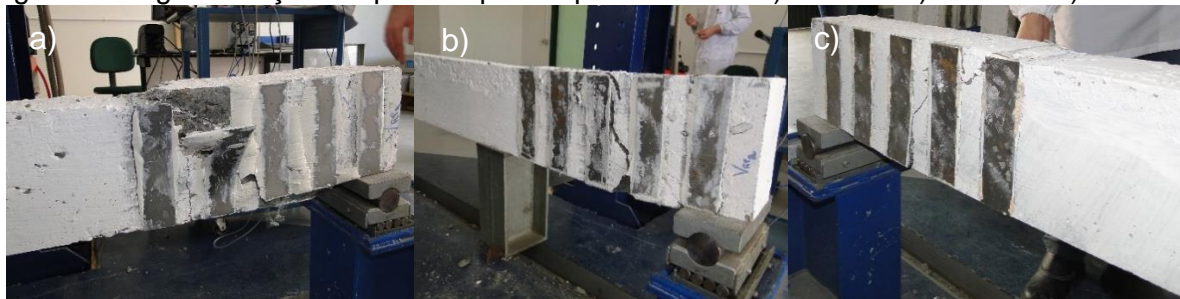


Figura 12: Viga sã reforçada após o ensaio – VRF3. a) Visão geral da viga. b) Detalhe das fissuras.



Fonte: Autor, 2015

Figura 13: Vigas reforçadas após rompidas após o ensaio. a) VRP1-e. b) VRP2-a. c) VRP3-a.



Fonte: Autor, 2015

#### 4. CONCLUSÕES

Após realizar este estudo, podemos obter as seguintes conclusões:

- O ensaio piloto foi fundamental para a definição do modelo utilizado nas demais vigas fabricadas.
- As vigas sã reforçadas obtiveram resultados satisfatórios, atendendo as expectativas, e aumentado a sua capacidade de suporte de carga em 50% em relação as vigas referência.
- A viga reforçada depois de rompida e preenchida a fissura com adesivo estrutural apresentou um aumento na capacidade de suporte de carga em 49,20% em relação às vigas de referência, portanto possui um desempenho satisfatório. Porém as vigas que tiveram as fissuras preenchidas com argamassa apresentaram queda na sua capacidade de suporte em 58,70% em relação às vigas de referência apresentando um desempenho insatisfatório.

- A aplicação do adesivo estrutural a base de epóxi mostrou-se fácil, seguindo as especificações do fabricante, para a colagem das chapas de aço SAE 1020 com 0,75 mm de espessura, contribuindo com o aumento da resistência nas vigas sujeitas ao ensaio de flexão à quatro pontos.
- Por fim, aplicando as chapas em vigas sãs, ou em vigas rompidas preenchendo as fissuras com adesivo estrutural epóxi, o reforço apresenta grande eficiência o que resulta no aumento da capacidade portante das mesmas.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- A redução no espaçamento dos estribos, verificando o rompimento na área cisalhante.
- A redução na quantidade de chapas de aço SAE 1020 com 0,75 mm de espessura, coladas na área cisalhante, verificando o seu desempenho.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa – determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro, 2008.

DEGHENHARD, Caroline Crozeta - **Análise experimental da capacidade portante em vigas de concreto armado sujeitas a flexão com reforço metálico colado na face tracionada**. Criciúma. 2013. 19p.

DE SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomaz - **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1998. 255 p.

METHA, Povindar Kumar e MONTEIRO, Paulo J. M., **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo: IBRACON ed., 2008. 674p.

PIMENTA, Taia Marinho. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com chapas metálicas, coladas com geopolímero, e com mantas de sisal coladas com resina epóxi**. Paraíba, 2012. 65p.

ALMEIDA, Jacinto M. A.. **Vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com elementos compósitos com fibras de vidro**. Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutural, ASAAE (Associação Sul Americana de Engenharia Estrutural), 2012. 14p.

DE COSTA, Angélica Medeiros–**Avaliação do potencial do reforço com chapa colada em vigas de concreto armado pós-fissuração**. Criciúma. 2014. 20p.