

## Estudo experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com chapas de aço

## Experimental study of reinforced concrete beams strengthened for flexure with steel plates

*Charlei Marcelo Paliga(1); Natiele Gonçalves Nicolini(2); Aline Ribeiro Paliga(3); Ariela da Silva Torres(4)*

1 Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas, RS, Brasil.

E-mail: charleipaliga@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0521-4764>

2 Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas, RS, Brasil.

E-mail: natiele\_nicolini@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4210-302X>

3 Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas, RS, Brasil.

E-mail: alinepaliga@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0003-1133>

4 Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas, RS, Brasil.

E-mail: arielatorres@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4686-9759>

**Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, vol. 6, n. 1, p. 20-37, Janeiro-Junho 2019 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Julho 08, 2018; Aceito: Maio 21, 2019]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2019.v6i1.2835>

### Endereço correspondente / Correspondence address

Charlei Marcelo Paliga

Rua Póvoas Júnior, 330 – Bairro Três Vendas

Pelotas/RS, Brasil

CEP 96055-680

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora: Luciana Oliveira Fernandes

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

## Resumo

Frequentemente, há necessidade de se reforçar um elemento estrutural, uma vez que o mesmo nem sempre é capaz de suportar um aumento de carga aplicada. Em razão disso, este trabalho teve como objetivo realizar um estudo da técnica de reforço estrutural à flexão, com chapas de aço coladas em vigas de concreto armado, a fim de verificar mudanças de comportamento das mesmas ao utilizar diferentes propostas para essa técnica. Para que os objetivos deste trabalho fossem atingidos, realizou-se um programa experimental, que consistiu na realização de ensaios à flexão com cinco vigas, sendo uma sem reforço e outras quatro reforçadas com chapas de duas diferentes espessuras. Duas foram reforçadas com chapa de aço somente colada e outras duas com chapa de aço colada e ancorada com *parabolts* em suas extremidades. Conforme os resultados experimentais obtidos, percebeu-se o aumento de resistência e rigidez das vigas reforçadas em relação à viga testemunho. Além disso, constatou-se que a espessura da chapa influenciou no desempenho do reforço e que a ancoragem com *parabolt* é de extrema importância para o melhoramento do sistema. O aumento de resistência não atingiu a porcentagem proposta pela metodologia de cálculo, evidenciando o cuidado que se deve ter na preparação da superfície de aplicação da chapa e do concreto. Concluiu-se que estudos de caracterização devem ser realizados com a resina epóxi e as ancoragens utilizadas para se obter o melhor desempenho das vigas reforçadas.

**Palavras-chave:** Reforço estrutural. Vigas de concreto armado. Chapa de aço colada. Ensaio à flexão.

## Abstract

There is often a need to reinforce a structural element, as it may not always support an increase on the applied load. Because of that, the objective of this work was to accomplish a study on the flexural reinforcement technique, with glued steel plates on reinforced concrete beams, to verify changes on the behavior of the reinforced beams when utilizing different approaches for this technique. For the objectives of this research to be achieved, an experimental program was performed, which consisted on the execution of flexural tests on five beams, of which one was not strengthened and the four other beams were strengthened with plates of two different thicknesses. Two were strengthened with glued steel plates only, and the other two with glued steel plates anchored by parabolts on their extremities. Per the experimental results obtained, the increase in resistance and bending stiffness of the reinforced beams in relation to the control beam was observed. Besides that, it was found that the plate thickness influenced the practical performance of the reinforcement, and that the parabolts anchoring is of extreme importance for improving this system. The increase in resistance was not reach the percentage proposed by the calculation methodology, showing that the necessary care must be taken on the preparation of the application surface for the plate and the concrete. It is concluded that characterization studies must be performed on the epoxy resin and anchoring utilized to obtain a better performance from the strengthened beams.

**Keywords:** Structural strengthening. Reinforced concrete beams. Glued steel plates. Flexural test.

# 1 Introdução

A falta de manutenção, acompanhamento e alterações no uso das edificações em concreto armado podem causar problemas que interferem no desempenho satisfatório das estruturas, e que muitas vezes são sanados apenas com grandes intervenções na edificação, a fim de recuperá-las ou de aumentar o seu espectro de utilização (NICOLINI, 2018). Dentre os métodos mais utilizados para estes fins tem-se o reforço/recuperação mediante o uso de chapas de aço coladas, sendo que esta técnica dispõe das vantagens proporcionadas pela resina epóxi que permite a união entre o concreto e o aço. A chapa de aço é frequentemente utilizada em vigas de concreto armado pois permite um aumento da área de aço no bordo tracionado, levando ao aumento ou restabelecimento da sua resistência à flexão, sem causar mudanças significativas na geometria do elemento. Entretanto, não basta adicionar diversas camadas de reforço para obter maior capacidade de carga, devendo-se respeitar o limite de 50% no incremento de esforços resistentes, segundo recomendações do *Bulletin d'Information n.162* (1983), a fim de atingir uma maior eficiência do sistema.

Frequentemente, os procedimentos que melhoram a aplicabilidade deste reforço levam em consideração as recomendações do *Bulletin d'Information n.162* (1983) do Comitê Euro-Internacional Du Béton (CEB), sendo que tal medida é necessária, visto que no Brasil não existem documentos normativos para este tipo de projeto. Desta maneira, as recomendações do CEB são norteadoras, assim como diversos estudos que apresentam metodologias de cálculo e comprovam que a técnica aumenta consideravelmente a resistência à flexão dos elementos estruturais. No entanto, mesmo se tratando de uma técnica antiga, ainda existem diversas discussões que procuram aperfeiçoar as metodologias de emprego deste reforço. Uma crítica bastante recorrente é a difícil visualização de possíveis deteriorações por corrosão da chapa de aço por eventual penetração de água entre a resina e chapa, bem como a instabilidade da resina epóxi a elevadas temperaturas, indicando-se o uso de parafusos para fixação do reforço minimizando o risco de colapso da estrutura em situação de incêndio. Desse modo, pesquisas que envolvam essa temática justificam-se pela necessidade de aperfeiçoar técnicas e se aprofundar na teoria de experiências vividas na profissão, conhecendo ainda mais as metodologias de reforço e recuperação de estruturas que são utilizadas atualmente nas edificações.

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficácia da técnica de reforço à flexão utilizando-se diferentes espessuras de chapas de aço coladas com resina epóxi, ancoradas com *parabolts* ou não, em vigas de concreto armado. Para isso, foi utilizado um procedimento analítico de cálculo para a determinação da área do reforço à flexão com chapa de aço colada para um incremento de resistência pré-determinado, analisando-se posteriormente, através de ensaios experimentais, mudanças de

comportamento da viga testemunho (não reforçada) ao aplicar-se o reforço. Ademais, mudanças no desempenho das vigas com diferentes espessuras de chapa de aço, além da necessidade de adicionar-se ancoragens nas extremidades das mesmas foram analisadas.

## 2 Materiais e método

Para realização do programa experimental foram moldadas cinco vigas, sendo que uma delas foi utilizada como viga testemunho, que após submetida à flexão, expressou a carga máxima suportada no limite de sua resistência, tornando-se esse o modelo padrão à análise comparativa. As quatro vigas restantes foram submetidas à flexão utilizando o reforço de chapas de aço de acordo com o ilustrado na Tabela 1.

**Tabela 1** – Características das vigas ensaiadas

Viga	Características
VT	Viga testemunho, sem reforço
VR2,65	Viga reforçada com chapa de 2,65 mm de espessura
VR2,65A	Viga reforçada com chapa de 2,65 mm de espessura e ancoragem
VR3,75	Viga reforçada com chapa de 3,75 mm de espessura
VR3,75A	Viga reforçada com chapa de 3,75 mm de espessura e ancoragem

Todas as vigas, com seção transversal de 12x20 cm de largura e altura, respectivamente, possuem comprimento total de 1,5 m, e vão efetivo de 1,3 m.

### 2.1 Concreto

Para a execução das cinco vigas utilizadas nos ensaios experimentais foi produzido em laboratório um concreto convencional de resistência característica à compressão,  $f_{ck}$ , igual a 20 MPa, sem adição de aditivos de qualquer natureza. Para alcançar esta resistência foi realizada a dosagem do concreto através do método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). O cimento utilizado foi o CP-IV 32, da marca Votorantin, que segundo o fabricante possui massa específica de 2,72 g/cm<sup>3</sup>. Para a areia natural quartzosa média encontrou-se um módulo de finura de 2,63 e uma massa específica de 2,57 g/cm<sup>3</sup>. A brita de origem granítica foi classificada como brita 1, possuindo dimensão máxima de 19 mm, massa unitária compactada igual a 1,61 g/cm<sup>3</sup> e massa específica de 2,63 g/cm<sup>3</sup>. Todos os ensaios de caracterização dos agregados seguiram as exigências das normas vigentes da ABNT.

Para a dosagem do concreto foi utilizada uma resistência média à compressão de 26,6 MPa (desvio padrão de 4,0 MPa) e uma relação água/cimento de 0,57. Ao final, chegou-se ao traço unitário em massa com as seguintes proporções: 1:1,73:3,08.

## 2.2 Aço

A armadura longitudinal das cinco vigas foi composta por quatro barras, sendo duas de diâmetro 8,0 mm na parte inferior, e duas de diâmetro 6,3 mm na parte superior da viga, ambas de aço do tipo CA 50. Na armadura transversal foram utilizadas barras de diâmetro 6,3 mm, distanciadas 10 cm uma das outras. A armação das vigas foi confeccionada levando-se em consideração os detalhes estabelecidos na NBR 6118 (ABNT, 2014). Assim, as armaduras foram distanciadas das faces da viga respeitando o cobrimento de 3 cm.

## 2.3 Reforço

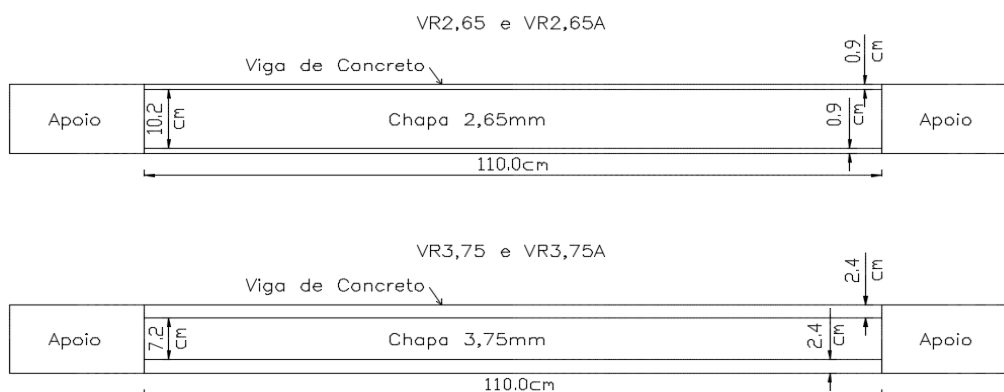
As chapas utilizadas para o reforço possuem o seu aço classificado como A36, ou seja, que possuem módulo de elasticidade de 210 GPa, e sua tensão de escoamento tem um valor de 250 MPa. As chapas possuem um comprimento de 1,10 m, isto é, igual a distância entre as faces internas dos apoios da viga.

A largura das chapas foi definida a partir da área da seção transversal de aço obtida pela metodologia de cálculo utilizada por Campagnolo *et al.* (1993), que resultou em 2,7 cm<sup>2</sup>, para possibilitar um aumento de carga de 25% das vigas reforçadas em relação à viga testemunho. A Figura 1 apresenta o desenho esquemático das vigas com chapas de 2,65 mm e 3,75 mm, respectivamente.

Para a ancoragem das chapas das vigas VR2,65A e VR3,75A foram utilizados *parabolts* de 8,0 mm de diâmetro e comprimento de 6,5 cm. Em cada chapa foram utilizados dois *parabolts*, ou seja, um em cada extremidade.

A colagem da chapa de reforço na viga de concreto foi feita através da resina epóxi da marca Sika, denominada Sikadur 31.

**Figura 1** – Vista inferior das vigas reforçadas com chapas de 2,65mm e 3,75mm



## 2.4 Metodologia de cálculo de Campagnolo *et al.* (1993) para a área do reforço

Para a determinação da área de aço do reforço aplicado neste estudo foi estipulado que nas vigas reforçadas haveria um acréscimo de 25% sobre a carga de projeto da viga testemunho. Portanto, a partir da área da armadura tracionada da viga encontrou-se o valor da carga de projeto de 13,63 kN, através dos parâmetros estabelecidos para dimensionamento à flexão de vigas de concreto armado na NBR 6118 (ABNT, 2014).

O cálculo da área de aço para o reforço levou em consideração um aumento de 25% sobre a carga aplicada na viga testemunho. Logo, a área de aço do reforço foi calculada para suportar uma carga de 17,04 kN.

A área da seção transversal da chapa de aço foi calculada a partir do método apresentado por Campagnolo *et al.* (1993), que considera que o concreto se encontra no estágio II, com a chapa de aço atingindo o limite de sua capacidade, ou seja, sua tensão é igual a tensão de escoamento do aço de reforço. Para alcançar o resultado, foi necessário realizar o cálculo por meio do *software Matlab*, e o resultado final para a área de aço da seção transversal do reforço foi igual a 2,7 cm<sup>2</sup>.

## 2.5 Execução das vigas e dos ensaios

As cinco vigas foram produzidas no mesmo dia, sendo executada uma betonada de concreto para cada viga, de onde foram retirados dois corpos de prova cilíndricos por betonada, resultando um total de dez elementos que foram rompidos à compressão aos 28 dias, sendo que os mesmos tiveram resistência média à compressão de 25,73 MPa com desvio padrão de 2,50 MPa. A concretagem foi feita em formas de madeira com as dimensões internas de 12x20x150cm. As armaduras foram colocadas, após a aplicação do desmoldante, respeitando-se o cobrimento de 3 cm das faces internas das formas. Esse distanciamento foi garantido por espaçadores plásticos.

Aos sete dias, as vigas foram desmoldadas lateralmente e, então, aos 28 dias, após o processo de cura que se deu em ambiente de laboratório com as vigas protegidas por lona plástica para impedir a perda acelerada de água para o meio ambiente, se iniciou a aplicação das chapas de reforço. As chapas de aço foram cortadas e furadas em laboratório, sendo que após, foram limpas com álcool para retirar óleos, graxas e impurezas da sua superfície.

As vigas foram lixadas para a retirada da camada mais frágil de concreto, e para se obter uma superfície plana para a colocação das chapas. Após a marcação do furo nas duas chapas com fixação extra por parabolts, estas foram posicionadas nas vigas VR2,65A e VR3,75A, e assim foram utilizadas como gabarito para a realização dos furos nas vigas de concreto.

O adesivo estrutural foi preparado posteriormente ao término da limpeza das superfícies e toda a sua aplicação seguiu as etapas recomendadas pelo fabricante. A camada de resina foi aplicada na face da viga com aproximadamente 1 a 2 mm de espessura, pois segundo o fabricante já é suficiente para promover a aderência entre as superfícies.

Posteriormente a aplicação da resina, foi colocada a chapa de aço e retirado o excesso das laterais. Nas vigas que possuíram fixação extra por parafusos foi colada a chapa e, em seguida, colocado o *parabolt* no local preparado. Por fim, e seguindo-se a recomendação do fabricante, a cura do adesivo estrutural foi feita aplicando pressão para expulsar todo o excesso de cola, sendo que após sete dias, foram realizados os ensaios à flexão. Na Figura 2 são mostradas as vigas prontas para os ensaios.

**Figura 2** – Vigas reforçadas prontas para serem ensaiadas



O ensaio à flexão foi realizado no Laboratório do Núcleo de Materiais e Técnicas Construtivas do Centro de Engenharias da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), utilizando-se a prensa hidráulica modelo YAW-2000 da marca Time Group Inc. A máquina de teste é controlada por um computador, e os resultados do ensaio e os seus respectivos gráficos foram gerados a partir do *software* WinWDW.

Todas as cinco vigas foram submetidas ao ensaio de flexão por três pontos, consistindo num sistema que aplicou uma única carga centrada nas vigas, que foram apoiadas em suas extremidades. Para aplicação da carga centrada foi utilizado um disco de aço entre a prensa e a viga de concreto. Desse modo, o ensaio à flexão foi realizado conforme apresentado na Figura 3.

**Figura 3 – Ensaio à Flexão**



A carga foi aplicada respeitando-se uma taxa de deslocamento de 5 mm/min para todas as vigas. Durante o ensaio foi acompanhada a carga máxima suportada, bem como a deformação da viga de aço com um relógio digital ligado ao *software* da prensa para a análise da sua influência nos deslocamentos da viga de concreto. Constatou-se, após os ensaios, que a deformação da viga de aço foi muito pequena, não influenciando, portanto, nos resultados.

### 3 Resultados e Discussões

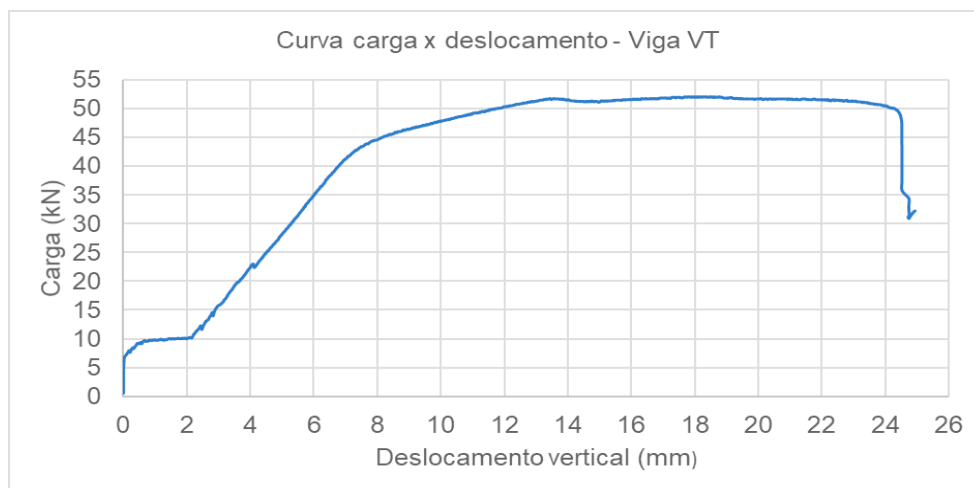
Para que os objetivos deste trabalho fossem atingidos, as seguintes análises comparativas foram estabelecidas:

- ♦ aumento da carga resistente apresentado pelas vigas VR2,65, VR2,65A, VR3,75 e VR3,75A em relação à viga testemunho;
- ♦ comparação da influência das espessuras de chapas utilizadas, a fim de verificar qual obteve melhor aproveitamento e desempenho;
- ♦ comparação das vigas VR2,65A e VR3,75A, a fim de verificar o desempenho prático da ancoragem.

#### 3.1 Comportamento da viga testemunho VT

A Figura 4 apresenta a relação carga x deslocamento durante a realização do ensaio até a viga testemunho atingir sua ruptura.



**Figura 4** – Gráfico carga x deslocamento da viga VT

O início do gráfico da Figura 4 apresenta um comportamento que se caracteriza pelo ajuste da prensa até a aplicação da carga uniforme no disco de aço. Portanto, o comportamento esperado da viga durante o ensaio iniciou-se com uma carga de aproximadamente 10 kN.

Observando a Figura 4 é possível identificar que a fissuração surge, primeiramente, com carga de 12 kN e um deslocamento de 2,3 mm. Posteriormente, acontecem mais duas aberturas, uma delas com carga de aproximadamente 14,5 kN e deslocamento de 2,8 mm, e outra com uma carga de aproximadamente 23 kN e flecha de 4 mm. As três fissuras que foram observadas aconteceram na parte inferior próximo ao centro da viga, o que era de se esperar, uma vez que as aberturas possuem essas características quando o carregamento é feito à flexão.

Nos incrementos de deslocamento observa-se que até aproximadamente 43 kN a viga suporta um aumento de carga proporcional ao deslocamento. A partir de então, pode-se concluir que a armadura tracionada da viga entra no estado plástico (escoamento), uma vez que o incremento de carga é menor para conseguir manter o incremento de deslocamento usado no ensaio. A carga máxima suportada pela viga foi de 52,05 kN, e seu deslocamento correspondente de 18,7 mm.

Quando a viga atinge um deslocamento de 24,2 mm ocorre o esmagamento do concreto, como apresentado na Figura 5, justificando, assim, a redução da carga apresentada no gráfico. Também podem ser observadas as três fissuras mencionadas anteriormente.

**Figura 5** – Esmagamento do concreto e fissuração da viga VT

Ao analisar-se o comportamento da viga VT como um todo, observou-se que a mesma passou pelos estágios de carga esperados, partindo da etapa onde a viga encontrou-se no estágio I (não fissurada), passando pelo estágio II (fissurada) até o estágio III, que se caracteriza pelo aço em seu estado plástico.

### 3.2 Análise Comparativa

A partir da análise do comportamento e dos resultados obtidos para cada uma das vigas, torna-se possível realizar a comparação do desempenho prático entre os tipos de reforços utilizados. Desse modo, abaixo seguem os comparativos realizados a fim de satisfazer os objetivos deste trabalho.

#### 3.2.1 Comparação das curvas carga $x$ deslocamento das vigas reforçadas em relação à viga testemunho

Inicialmente, os valores de resistência obtidos e as porcentagens de aumento de carga das vigas reforçadas em relação à viga testemunho são apresentados na Tabela 2.

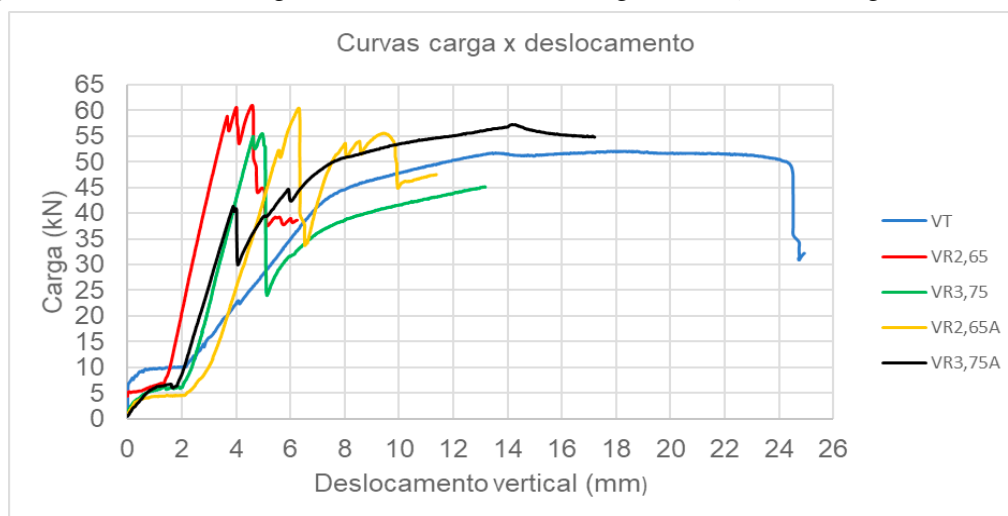
**Tabela 2** – Resultados do aumento de carga das vigas reforçadas

Viga	Carga Máxima (kN)	Aumento de Carga em relação a viga VT
VT	52,05	
VR2,65	61,00	17,2%
VR2,65A	60,45	16,1%
VR3,75	55,5	6,6%
VR3,75A	57,25	10%

A partir dos resultados gerados pelo *software* da prensa foi possível relacionar os dados obtidos para a viga testemunho com as vigas reforçadas, sendo que a curvas

carga x deslocamento das cinco vigas ensaiadas são apresentadas na Figura 6. Vale ressaltar que todas as vigas passaram, no início do carregamento, pelo processo de ajuste da prensa, sendo que os comportamentos esperados se iniciam após isso.

**Figura 6** – Gráfico carga x deslocamento das vigas reforçadas e viga testemunho



Fazendo-se uma observação dos gráficos apresentados na Figura 6 fica evidente que em todos os casos houve mudança significativa no comportamento das vigas reforçadas em relação à viga testemunho, e que a chapa de aço contribuiu para o aumento de carga resistente das vigas reforçadas. Ademais, observa-se que para os deslocamentos finais todas as vigas tendem a seguir a mesma inclinação, pois onde não há mais a contribuição do reforço, a viga é suportada apenas pela sua armadura interna, seguindo assim, o mesmo comportamento da viga testemunho. Entretanto, o modo de ruptura das vigas reforçadas difere em relação à viga testemunho, que teve ruptura típica de flexão. A ruptura das quatro vigas reforçadas se deu por descolamento da chapa de aço em relação ao substrato de concreto, que segundo Beber (2003), é o modo de ruptura mais observado nesse tipo de elemento. Na Figura 7 pode ser observado o descolamento do reforço acontecido durante o ensaio da viga VR2,65, sendo que o início desta ruptura se deu para um deslocamento da ordem de 3,5 mm, conforme pode ser constatado através da Figura 6.

**Figura 7** – Destacamento do concreto da viga VR2,65

A carga máxima atingida pela viga VR2,65A foi de 60,45 kN e uma flecha correspondente de 6,3 mm, no momento em que aconteceu um grande descolamento da chapa, ficando, a mesma, fixada ao substrato de concreto somente pelo *parabolt*. Como era de se esperar, a carga volta a aumentar, como pode ser observado pela Figura 6, mostrando a importância da fixação da chapa, até o momento em que há a ruptura por cisalhamento do *parabolt*, com o deslocamento da viga próximo aos 10 mm. Sucedendo-se a isso, as tensões de tração passam a ser absorvidas somente pela armadura interna, não sendo mais possível um aumento significativo na carga aplicada para se manter o incremento de deslocamento usado no ensaio. Assim, é possível que houvesse um aumento de carga ultrapassando o seu valor máximo obtido (60,45 kN) caso não fosse rompido o *parabolt*, evidenciando, assim, a importância no planejamento do sistema de ancoragem.

Para a viga VR3,75, o ajuste da prensa para início do ensaio de flexão se deu com uma carga de aproximadamente 5,9 kN, com deslocamento da ordem de 2,0 mm, como pode ser observado no gráfico da Figura 6. Verifica-se, no gráfico, que a carga e o deslocamento são proporcionais até 55 kN, com a viga no Estádio I, caracterizado pela ausência de fissuras de flexão. O deslocamento correspondente a esta carga foi de 4,7 mm, sendo que após este ponto, ocorre uma queda no gráfico que é causada pelo início do descolamento da chapa no centro da viga. Seguido a isso, a viga atingiu sua carga máxima de 55,5 kN, quando foi submetida a um deslocamento de 4,9 mm, acontecendo após, o desprendimento da chapa próximo a um dos apoios.

A viga VR3,75A atingiu sua carga máxima aos 57,25 kN, com um deslocamento correspondente de 13,8 mm. Pode ser observado ao analisar-se a Figura 6, que após o deslocamento de 5,7 mm, onde já havia acontecido o descolamento da chapa de aço, a carga continua aumentando devido à ação dos *parabolts* utilizados como ancoragem nas extremidades do reforço, com provável escoamento da armadura interna de tração para uma carga de aproximadamente 50 kN. Ao atingir um deslocamento próximo aos 14 mm, há uma diminuição no nível de carga aplicada sobre a viga devido,

provavelmente, ao estado de deformações excessivas no aço da armadura interna de tração. A Figura 8 apresenta a viga VR3,75A após o ensaio finalizado, onde ressalta-se que, apesar da deformação visível no *parabolt*, não houve a sua ruptura.

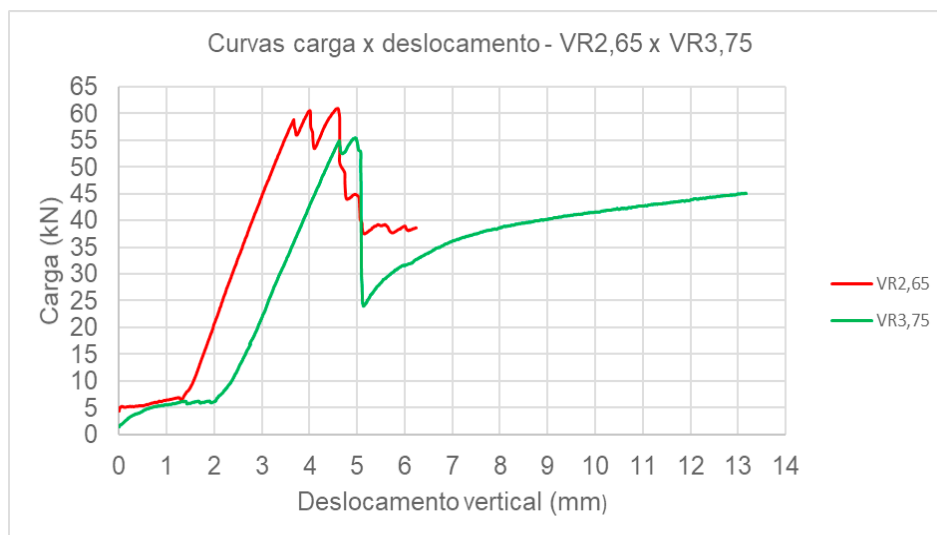
**Figura 8** – Descolamento da chapa de aço da viga VR3,75A

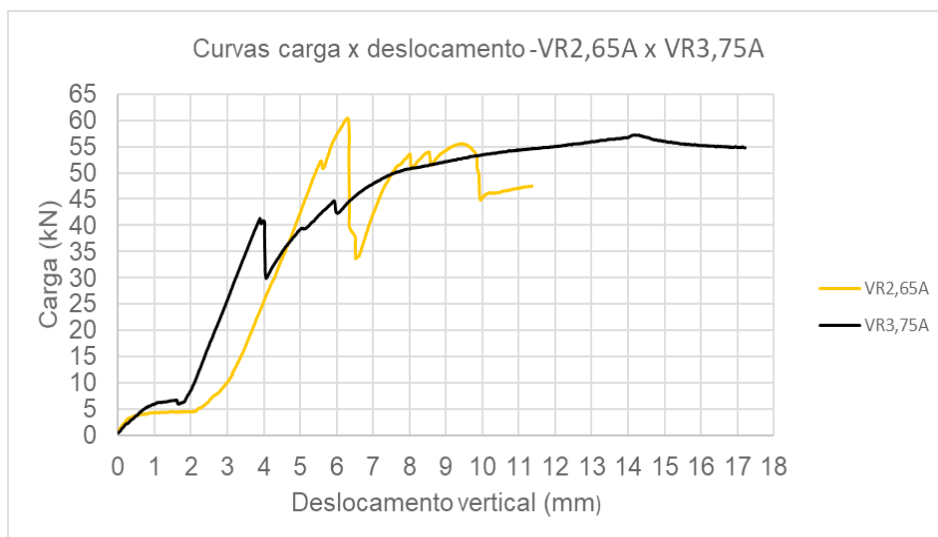


### 3.2.2 Comparação dos resultados das vigas reforçadas com diferentes espessuras

Constatou-se que a espessura da chapa é de extrema importância no desempenho do reforço. Portanto, como foram utilizadas duas espessuras, determinadas de acordo com a disponibilidade do fabricante, foi possível fazer a relação entre os resultados experimentais obtidos. A Figura 9 apresenta os resultados obtidos para as vigas reforçadas com diferentes espessuras e sem ancoragem. Já a Figura 10 aponta os resultados para as vigas com o sistema de ancoragem das chapas.

**Figura 9** – Gráfico carga x deslocamento das vigas VR2,65 e VR3,75



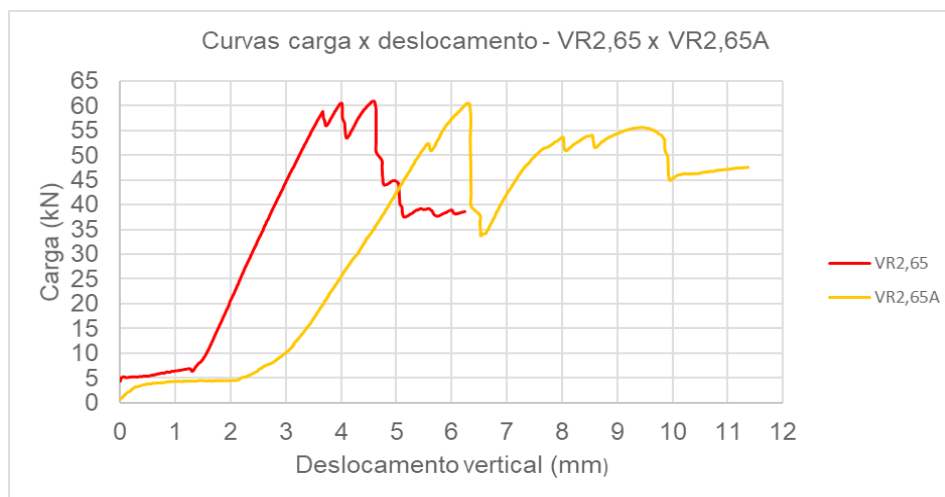
**Figura 10** – Gráfico carga x deslocamento das vigas VR2,65A e VR3,75A

Analisando-se os gráficos apresentados nas Figuras 9 e 10 é possível identificar que as maiores resistências foram obtidas nas vigas em que foi utilizada a menor espessura da chapa. Consequentemente, nas vigas com maior largura das chapas de reforço. Esses resultados vão ao encontro das recomendações de projeto indicadas pelo *Bulletin d'Information n.162* (1983) do *Comite Euro-Internacional Du Béton* (CEB), onde aponta-se que a espessura máxima das chapas deve ser limitada em 3 mm. Esta recomendação visa a não utilização de chapas espessas, pois estas possuem menor flexibilidade, facilitando, assim, o seu descolamento e contribuindo para a menor eficiência e subutilização do sistema de reforço. Ademais, uma possível explicação para as vigas com chapas de menor espessura apresentarem melhor comportamento é que as mesmas demandam maior largura da chapa para manter a área da seção transversal obtida no dimensionamento do reforço, aumentando, dessa maneira, a área de contato reforço/substrato de concreto, provocando a redução nas tensões de aderência entre os dois materiais. Vale ressaltar, que elevados valores de tensão de cisalhamento horizontal entre os materiais é que pode causar o descolamento da chapa.

Corroborando com o que foi escrito anteriormente, a observação dos gráficos de comportamento apresentados na Figura 10 indicam a importância do sistema de ancoragem do reforço, e que, caso não houvesse a ruptura do *parabolt* da VR2,65A, a mesma possivelmente apresentaria resultados melhores que os encontrados.

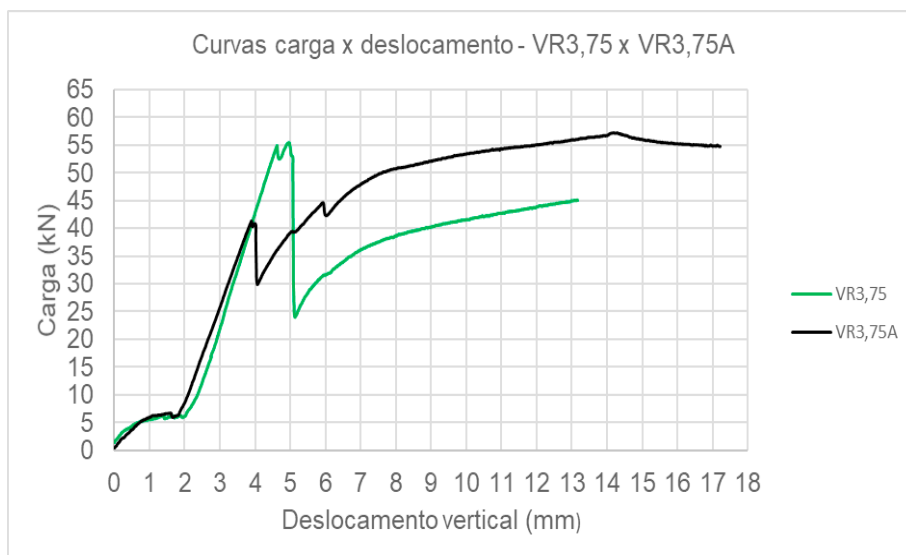
### 3.2.3 Comparação das vigas reforçadas com e sem ancoragem

Ao utilizar-se ancoragem no reforço à flexão em vigas de concreto armado com chapa de aço colada, o comportamento do sistema apresenta diferentes variações. Sendo assim, a seguir são apresentados os estudos comparativos entre as vigas reforçadas com e sem ancoragem. A Figura 11 apresenta os resultados obtidos para as vigas com chapa de espessura 2,65 mm, com e sem ancoragem.

**Figura 11** – Gráfico carga x deslocamento das vigas VR2,65 e VR2,65A

Examinando-se os resultados para as vigas VR2,65 e VR2,65A apresentados na Figura 11, e desprezando-se o início das curvas onde houve o ajuste da prensa, sendo que para a VR2,65A levou um tempo maior para tal, é possível perceber que os desempenhos das duas vigas são muito próximos. Entretanto, como pode-se constatar, após o descolamento da chapa de aço a viga que possui a ancoragem no reforço conseguiu aumentar seu nível de sollicitação, o que não foi notado na VR2,65. Como houve um rompimento inesperado do *parabolt* de fixação da chapa da VR2,65A, a mesma não pode ter continuidade no aumento de carga, indicando a importância do dimensionamento do sistema de fixação, e sendo o mesmo imprescindível para a uma maior eficiência do conjunto.

A partir da Figura 12, que expõe os resultados obtidos para as vigas com chapa de espessura 3,75 mm com e sem ancoragem, é possível observar que a carga máxima alcançada para a viga com ancoragem obteve um melhor desempenho. Sendo assim, confirmou-se a recomendação apresentada no *Bulletin d'Information n.162* (1983) do *Comite Euro-Internacional Du Béton* (CEB), que indica que quando há necessidade da utilização de chapas com espessuras maiores que 3 mm é indispensável o uso de ancoragens, pois sem elas, pode haver dificuldades das chapas em se adaptarem a superfície de concreto. Ademais, o deslocamento relacionado à carga máxima da viga VR3,75A apresentou um valor relativamente grande em relação ao deslocamento apresentado pela viga VR3,75, devido a ação do *parabolt* após o descolamento da chapa. Dessa forma, fica fácil o entendimento da importância do sistema de ancoragem em chapas de aço coladas funcionando como reforços em vigas de concreto armado.

**Figura 12** – Gráfico carga x deslocamento das vigas VR3,75 e VR3,75A

## 4 Considerações Finais

Com os resultados dos ensaios experimentais e as correlações estabelecidas neste trabalho foi possível alcançar algumas conclusões sobre o desempenho das vigas reforçadas em relação à viga testemunho, e entre os diferentes modelos de reforço utilizando chapa de aço colada.

Inicialmente, pode-se concluir que se obteve um considerável aumento de carga resistente das diferentes vigas reforçadas em relação à viga testemunho, isso porque após a aplicação do reforço tem-se um sistema composto por concreto, resina e aço. Sendo assim, a chapa atua como armadura adicional ao elemento estrutural. Os estudos de Souza e Ripper (1998) e Campagnolo *et al.* (1997) afirmam que o modo de ruptura do reforço, quando bem aplicado, se dá com o destacamento do cobrimento de concreto próximo aos apoios, isso porque a máxima tensão no centro da chapa é redistribuída para as extremidades. Sendo assim, se observou que a maior carga resistente obtida foi para a viga VR2,65, onde a ruptura ocorreu com as características do modo de ruptura deste sistema, concluindo-se que o melhor aproveitamento do reforço aconteceu para esta viga. Entretanto, cabe salientar que as cargas de ruptura das vigas VR2,65 e VR2,65A foram muito próximas, e que houve a ruptura do sistema de ancoragem da VR2,65A. A partir disso, acredita-se que caso não houvesse a ruptura do *parabolt* essa viga alcançaria níveis mais elevados de carga quando comparado aos outros elementos estruturais testados neste trabalho.

As vigas VR2,65A, VR3,75 e VR3,75A dispuseram de um aumento de carga resistente, porém menor que a viga VR2,65, pois apresentaram ruptura entre a ligação resina e chapa. Neste caso, constatou-se que pode ter ocorrido falhas na ligação devido a qualidade do adesivo estrutural, como afirma Reis (1998). Sendo assim, torna-se



duvidosa a adesividade da resina epóxi utilizada neste trabalho, visto que a mesma deve garantir a aderência entre as superfícies resistindo aos esforços tangenciais que surgem pela aplicação do carregamento externo.

Embora as vigas reforçadas tenham suportado uma carga superior à viga testemunho, essas não atingiram o aumento de carga proposto quando do dimensionamento da área da seção transversal das chapas através da metodologia de cálculo de Campagnolo *et al.* (1993). Entretanto, é importante frisar que tal metodologia considera que exista uma aderência perfeita entre o substrato de concreto e o material de reforço, descartando, assim, o modo de ruptura mais observado na literatura científica para vigas de concreto armado reforçadas com chapas de aço. Assim, esses resultados podem ter acontecido devido a todas as vigas ensaiadas terem atingido a ruptura por falha na ligação do reforço ao substrato de concreto, ao invés das rupturas clássicas de elementos submetidos à flexão.

Além de Campagnolo *et al.* (1997) assegurarem que é indispensável o uso da resina, outro fator de extrema importância para garantir um melhor desempenho do reforço é o estudo das propriedades e do dimensionamento das ancoragens utilizadas. Através dos ensaios das vigas VR2,65A e VR3,75A foi certificado que, mesmo sem o dimensionamento da ancoragem, os *parabolts* contribuíram para o desempenho efetivo do conjunto, uma vez que possibilitaram que houvessem aumentos nas cargas aplicadas após o descolamento das chapas, fato que não foi observado nas vigas com chapas apenas coladas.

Concluiu-se, também, através dos resultados obtidos nesse trabalho, que houve um aumento significativo de rigidez em todas as vigas reforçadas em comparação à viga testemunho, em razão de que a chapa do reforço atua na região onde ocorrem fissuras provenientes dos esforços de flexão. Assim, a chapa de aço fez com que os elementos estruturais perdessem sua propriedade de ductilidade, ou seja, atingissem suas cargas máximas sem que sofressem grandes deformações, corroborando com os resultados apresentados em Paliga (2008), onde diz que, geralmente, a ductilidade de um elemento reforçado à flexão diminui em relação ao elemento não reforçado. Ademais, fissuras de flexão não foram observadas nas vigas reforçadas antes do descolamento das chapas, sendo que as mesmas servem como indício de sobrecarga nos elementos. Foi possível perceber, também, que apesar das chapas de aço possuírem a mesma área de seção transversal, a espessura e a largura das chapas influenciaram diretamente nos resultados.

## Referências

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

BEBER, A. J. *Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono*. Porto Alegre, 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

CAMPAGNOLO, J. L.; CAMPOS FILHO, A.; SILVA FILHO, L. C. P. Estudo do comportamento estrutural e do problema de ancoragem em vigas de concreto armado reforçadas com chapas de aço coladas. In: *XXVI JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL*. Montevideo, Uruguay, novembro, 1993. p. 15-19.

CAMPAGNOLO, J. L.; CAMPOS FILHO, A.; SILVA FILHO, L. C. P. Estudo-teórico experimental sobre vigas de concreto armado reforçadas. In: *CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES*, 1997. Porto Alegre, 1997. p. 127-134.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. Assessment on Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading. *Bulletin d'Information*, n. 162, 1983.

NICOLINI, N. G. *Estudo experimental para o reforço à flexão, com chapas de aço, em vigas de concreto armado*. Pelotas, 2018. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2018.

PALIGA, C. M. *Análise probabilística de vigas de concreto armado recuperadas à flexão, através do método de Monte Carlo utilizando um modelo de elementos finitos*. Porto Alegre, 2008. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

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*. São Carlos, 1998. 239 f. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto*. 1. Ed. São Paulo: Pini, 1998. 262 p.