

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA CAPACIDADE PORTANTE EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS A FLEXÃO COM REFORÇO METÁLICO COLADO NA FACE TRACIONADA

Caroline Crozeta Deghenhard (1), Alexandre Vargas (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1) caroline.crozeta@gmail.com, (2) avargas@unesec.net

RESUMO

As estruturas de concreto armado quando bem projetadas e executadas, possuem uma grande durabilidade, contudo necessitam de manutenções preventivas e corretivas para garantir a sua funcionalidade. Os reforços são soluções para evitar problemas na construção civil e ainda aumentar a capacidade portante dos elementos estruturais, que por diversos motivos não atendem mais os requisitos para os quais foram projetados. O presente estudo tem como objetivo, avaliar experimentalmente a capacidade portante de vigas de concreto armado, com reforço metálico de chapas de aço SAE 1020 de diferentes espessuras, coladas com adesivo estrutural epóxi na face tracionada das vigas, comparando 4 grupos, A, B, C e D. Foram moldadas 3 vigas para cada grupo, com exceção do grupo A, cada conjunto recebeu reforço com chapa de aço de espessuras, 0,75 mm, 1,50 mm e 2,25 mm, respectivamente. A primeira análise realizada durante os ensaios foi o carregamento para atingir o deslocamento vertical máximo permitido por norma (L/250). A segunda e última análise feita constituiu no carregamento e no deslocamento vertical no momento da ruptura. Com os resultados dos ensaios, concluiu-se a eficiência do reforço metálico pelo método sugerido em relação ao grupo A, neste caso, o acréscimo da capacidade portante foi inversamente proporcional ao aumento da espessura da chapa de aço SAE 1020. Destaca-se ainda, que o maior incremento de cargas foi de 36%, inferior aos 50% recomendados pela literatura, obtendo-se dessa forma, uma validação da técnica proposta.

Palavras-Chave: Vigas Reforçadas. Adesivo Estrutural. Chapas de Aço SAE 1020.

1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, o homem vem se preocupando em adaptar as construções as suas necessidades, o que permite o avanço da tecnologia da construção (a concepção, o cálculo, a análise e o detalhamento das estruturas), tecnologia de materiais e técnicas construtivas. O crescimento acelerado trouxe inovações que estão susceptíveis a maiores riscos. As construções apresentam várias limitações

quanto ao desenvolvimento científico e tecnológico, as falhas em algumas estruturas podem levar a desempenhos insatisfatórios. Este grupo de variáveis é denominado deterioração estrutural, conforme menciona Souza e Ripper¹, (1998, p.13):

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.

O ramo da engenharia designado por patologia das estruturas ocupa-se do "estudo das origens, manifestações, consequências e ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação das estruturas." (Souza; Ripper¹, 1998, p.14)

Em alguns casos, há necessidade de reabilitação ou reforço em prazos curtos, para garantir o sucesso das construções. A condição para os serviços de recuperação e reforços das estruturas de concreto depende da análise precisa das causas que os tornam necessários e do estudo detalhado dos efeitos produzidos. Definidos estes dois pontos, passa-se então à escolha da técnica adequada, que inclui a cuidadosa seleção dos materiais e equipamentos a serem empregados, e da mão-de-obra necessária para a execução do serviço. "O reforço caracteriza-se como uma atividade específica para os casos em que se deseja melhorar o desempenho de uma estrutura, dotando-a de maior resistência e/ou rigidez." (Tisot², 2010, p.10)

Nesse sentido, o presente trabalho busca estudar através do dimensionamento teórico e de uma análise experimental, a capacidade portante de vigas de concreto armado submetidas à esforços de flexão, reforçadas com chapas de aço SAE 1020 de diferentes espessuras, coladas com adesivo estrutural epóxi na face tracionada das vigas. De acordo com Santos³, (2008, p.17):

O reforço por adição de chapas metálicas coladas é caracterizado pela união da superfície de concreto a chapas de aço através de uma resina com alta capacidade de adesão e resistência mecânica. É uma opção para reforço de elementos de concreto, de rápida e simples execução, recomendada principalmente quando é necessário reforçar a estrutura em um tempo curto ou não é possível fazer grandes alterações na geometria da peça. No final do processo tem-se um elemento estrutural composto por concreto-resina-aço, o que possibilita à estrutura uma resistência maior ao esforço cortante e ao momento fletor. Como consequência tem-se um elemento mais rígido que deforma pouco antes de iniciar o colapso. É de fundamental importância que a resina utilizada para fazer a colagem concreto-aço seja de qualidade comprovada e a superfície do concreto e do aço sejam preparadas.

Essa técnica é considerada por Pimenta⁴ (2012, apud Cánovas, 1998), "de alta eficácia podendo ser aplicada a vigas, tanto em obras mais usuais, como em edifícios e obras de pequeno porte, mas também pode ser usada em pontes e viadutos."

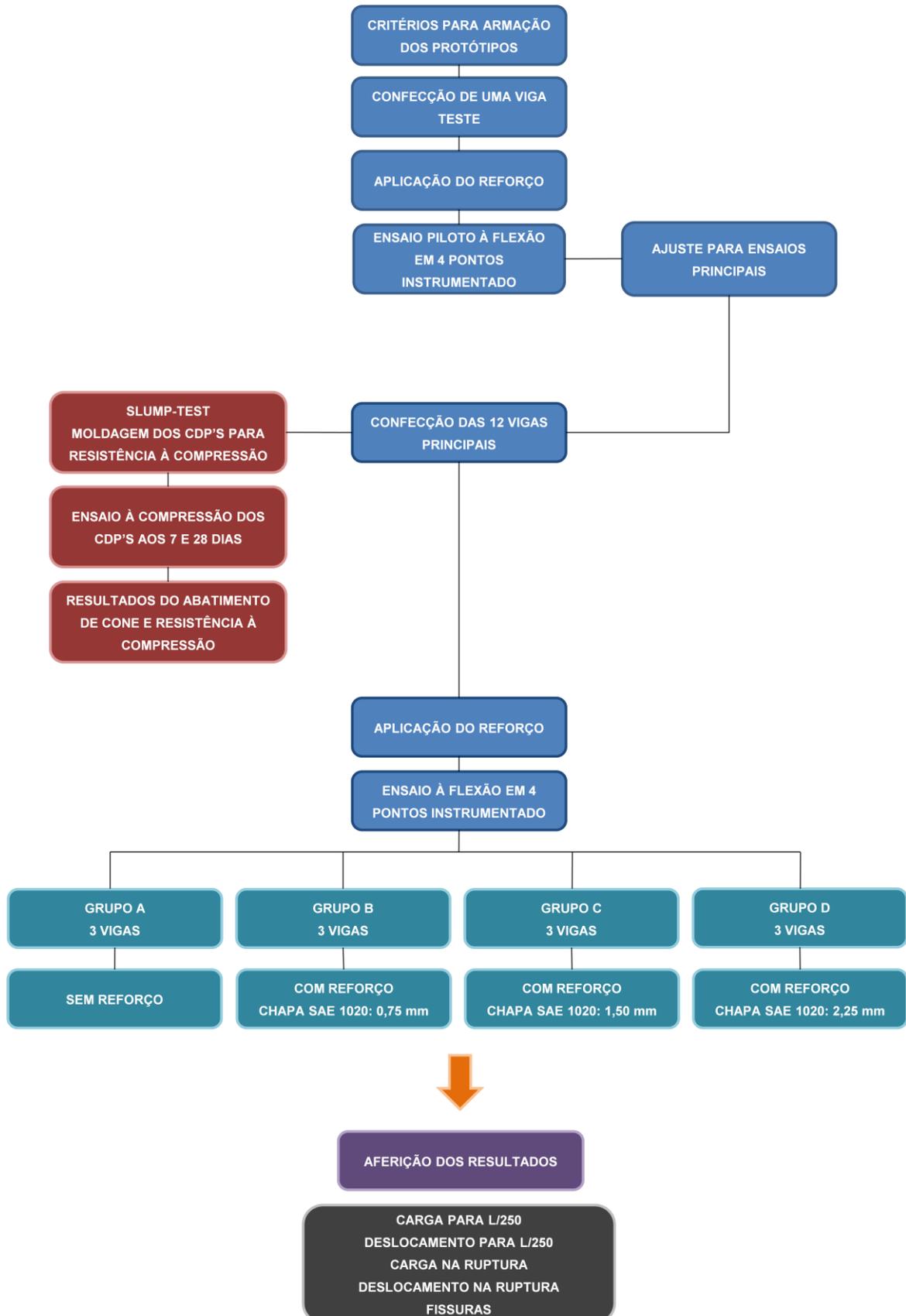
2. MATERIAIS E MÉTODOS

O planejamento experimental para o presente trabalho foi dividido em duas fases. A primeira, corresponde a um ensaio piloto de flexão em 4 pontos com uma única viga reforçada com chapa de aço SAE 1020, com a menor espessura encontrada no mercado (0,75 mm), cujo objetivo foi avaliar o sistema de aplicação concreto-resina-aço e o aparato de ensaio, evitando imprevistos para as etapas posteriores.

A segunda fase seguiu com a confecção de 12 vigas divididas em 4 grupos, compostos cada um por 3 vigas. Com exceção do grupo A que é referência, cada grupo recebeu reforço com chapa de aço SAE 1020 na face tracionada das vigas. Foram utilizadas respectivamente, chapas com espessuras de 0,75 mm (grupo B), 1,50 mm (grupo C) e 2,25 mm (grupo D). Paralelo aos ensaios de flexão instrumentado em 4 pontos, foram realizados ensaios complementares, como o *slump-test* (abatimento de tronco de cone), de maneira a confirmar se o concreto estava de acordo com o solicitado por norma. Também foram moldados 6 corpos de prova, conforme as especificações da NBR 6118:2007⁵ com a finalidade de caracterizar o concreto quanto a resistência à compressão aos 7 e 28 dias. Os ensaios de caracterização do concreto foram realizados no LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNESC, localizado no Iparque, respeitando o estabelecido pela NBR 5739:2007⁶.

No fluxograma apresentado da Figura 1, pode-se visualizar as subdivisões do procedimento experimental.

Figura 1: Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

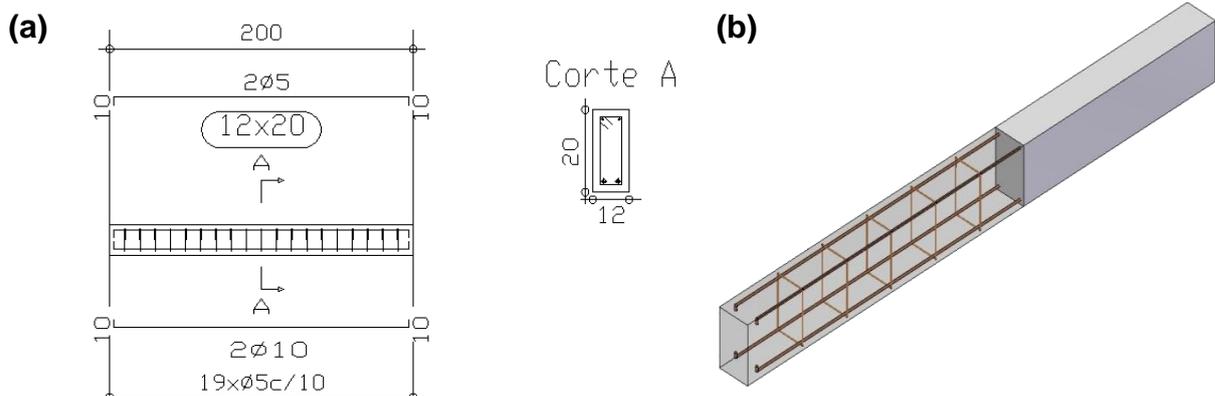
2.1. CRITÉRIOS PARA DIMENSIONAMENTO E CONFEÇÃO DAS VIGAS

As vigas foram confeccionadas com seções transversais de 12x20 cm e 200 cm de comprimento. As armaduras de flexão foram dimensionadas segundo os critérios da NBR 6118:2007⁵, considerando a resistência característica do concreto utilizado de 25 MPa e aço CA-50, resultando na armadura inferior, área de 1,6 cm², adotando-se duas barras de 10 mm de diâmetro para testar o sistema de reforço.

O critério de dimensionamento adotado, foi o de a viga atuar no domínio 3 ($x/d = 0,2893$), em virtude dos resultados de trabalhos anteriores realizados no LEE - Laboratório Experimental de Estruturas da UNESC, localizado no Iparque, indicarem essa a melhor condição para análise de deslocamentos.

Os estribos tiveram o espaçamento de 10 cm e diâmetro de 5 mm, utilizando o critério de mínimo diâmetro e máximo espaçamento para armadura mínima, estabelecido pela NBR 6118:2007⁵. A Figura 2 mostra o detalhamento das armações empregadas nas amostras.

Figura 2: Detalhamento das armaduras nas vigas - (a) Detalhamento longitudinal; (b) Perspectiva da armação.



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

As doze vigas foram concretadas simultaneamente com concreto C25 dosado em central, adensado com auxílio de vibradores de imersão e de superfície para o acabamento. Foram utilizados espaçadores na classe de agressividade ambiental II - 2,5 cm, para garantir o cobrimento da armadura. O local escolhido para a concretagem foi o pátio de uma construtora local que cedeu o espaço. A Figura 3 mostra a sequência da confecção das vigas.

Figura 3: Confeção das vigas de concreto armado - (a) Montagem das formas; (b) Adensamento; (c) Regularização.



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

2.2. APLICAÇÃO DOS REFORÇOS DE CHAPA DE AÇO SAE 1020

O processo de desforma nas vigas sucedeu aos 7 dias, e após 14 dias, as mesmas foram transportadas ao LEE - Laboratório Experimental de Estruturas da UNESC. As chapas de aço SAE 1020 foram padronizadas em todas as vigas com mesma largura e comprimento, 12x150 cm respectivamente.

O adesivo estrutural utilizado foi o EP, um bicomponente a base de epóxi da marca Bautech[®], com características de alta adesividade, resistência química e mecânica, material pré-dosado, impermeável a água e óleo, além de dureza inicial em 12 horas e cura total em 7 dias. A aplicação do adesivo estrutural epóxi nas vigas seguiu as recomendações do fornecedor, iniciando pelo preparo do substrato, em que a superfície de aplicação foi isenta de pó, desmoldantes ou qualquer substância que atrapalhasse na adesão, sendo esse procedimento realizado com auxílio de uma escova de aço. O preparo do adesivo estrutural epóxi, ocorreu pela homogeneização dos componentes separadamente de forma manual. Após, adicionou-se o componente B (endurecedor) sobre o componente A (resina), misturando-os por 5 minutos. A aplicação do adesivo estrutural epóxi, foi realizado com auxílio de uma espátula sobre toda superfície a ser colada, com espessura mínima de 2 mm.

Foram consumidos 4,5 kg de adesivo estrutural epóxi para aplicação nas 9 vigas dos grupos B, C e D, assim denominados os grupos com reforço metálico, o que resultou em um consumo de 2,78 kg/m². Antes da aplicação do adesivo, foram realizadas ranhuras por intermédio de uma lixadeira elétrica nas chapas de aço, objetivando melhorar as condições de aderência junto à superfície do concreto.

Após a fixação das chapas, as mesmas foram submetidas a uma rápida pressão uniforme, para que o excesso de resina porventura existente fosse expulso, esta pressão foi exercida, através de um martelo de borracha. Posteriormente, blocos de concreto foram posicionados nas extremidades e na região central das chapas, sistema este mantido por 7 dias, encoberto por lona. A aplicação do adesivo estrutural epóxi nas vigas principais foi realizado aos 21 dias, e o ensaio instrumentado após os 28 dias da concretagem. As etapas do preparo do substrato, do adesivo estrutural epóxi, bem como a aplicação das chapas de aço nas vigas podem ser visualizadas na Figura 4.

Figura 4: Etapas da aplicação do reforço - (a) Preparo do substrato; (b) Limpeza da superfície de aplicação; (c) Aplicação do adesivo estrutural epóxi; (d) Marcação para fixação das chapas de aço SAE 1020; (e) Preparo das chapas de aço SAE 1020; (f) Fixação e escoramento das chapas de aço SAE 1020.



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

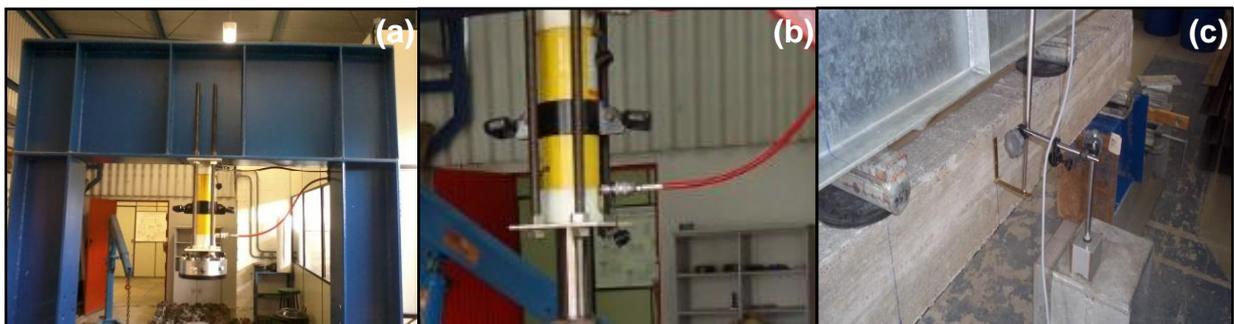
2.3. METODOLOGIA DE ENSAIO NAS VIGAS

Para os ensaios realizados no LEE – Laboratório Experimental de Estruturas da UNESC, foram utilizados um pórtico metálico, um cilindro hidráulico com capacidade

de 500 kN, célula de carga na base do cilindro, transdutor de deslocamento de 100 mm (LVDT). Todos ligados ao sistema de aquisição de dados Quantum X[®] que utiliza o *software* Catman Easy[®], ambos da marca HBM[®]. A Figura 5 mostra o detalhamento do equipamento.

Todas as vigas foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos. As cargas foram aplicadas de cima para baixo pelo cilindro hidráulico sobre um perfil metálico que transferiu o carregamento para as vigas em duas cargas pontuais divididas exatamente nos terços do vão teórico da viga. O posicionamento dos elementos está detalhado na Figura 6.

Figura 5: Equipamento e acessórios - (a) Pórtico metálico; (b) Cilindro hidráulico; (c) LVDT.



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

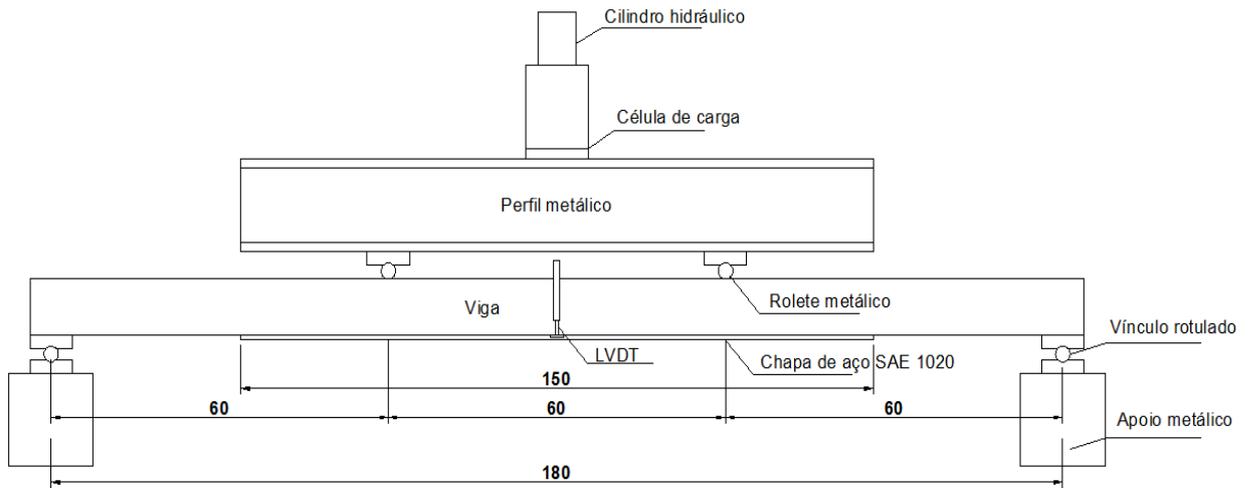
As verificações foram feitas de modo a analisar o comportamento de cada grupo em diferentes instantes de aplicação de carga:

- Quando atingido o deslocamento máximo permitido por norma ($L/250$);
- Na ruptura;
- Abertura de fissuras.

No primeiro instante foi verificado o carregamento necessário para que as vigas atingissem o deslocamento máximo estabelecido por norma ($L/250$), foi considerado ($L = 180$ cm) sendo o vão teórico das vigas, no qual foi encontrado um valor para o deslocamento de 7,20 mm.

No segundo e último instante do ensaio, foi verificado o carregamento para levar a viga à ruptura e verificado o deslocamento nesse instante, as fissuras foram analisadas como critério visual para mostrar a deformação permanente das vigas.

Figura 6: Posicionamento dos elementos no ensaio instrumentado de 4 pontos.



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. SLUMP-TEST

O *slump-test* foi realizado com intuito de verificar a trabalhabilidade do concreto em seu estado plástico, buscando medir sua consistência. A Figura 7 indica um resultado satisfatório de abatimento de cone igual a 11 cm, nível este desejável, pois a NBR 6118:2007⁵ permite uma variação entre 5 a 12 cm para uma consistência medianamente plástica.

Figura 7: *Slump-test* - (a e b) Distância entre a haste e o ponto médio do concreto.



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

3.2. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado aos 7 e 28 dias, com os corpos de prova mantidos em cura submersa. Os resultados obtidos no ensaio foram compilados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados da resistência à compressão axial.

Corpos de prova (7 Dias)	Tensão (MPa)	Corpos de prova (28 Dias)	Tensão (MPa)
CP 01	18,10	CP 01	30,00
CP 02	24,00	CP 02	27,80
CP 03	22,00	CP 03	31,30
<i>Média</i>	<i>21,37</i>	<i>Média</i>	<i>29,70</i>
<i>Desvio Padrão</i>	<i>3,00</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>1,77</i>

Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

3.3. ENSAIO PILOTO

O ensaio piloto realizado permitiu uma análise criteriosa quanto a aderência do adesivo estrutural epóxi à chapa de aço, pois houve o descolamento na interface resina-aço quando atingido o deslocamento máximo permitido por norma (L/250). Com essas observações, foi possível aprimorar a metodologia de aplicação do adesivo estrutural epóxi aumentando a rugosidade nas chapas de aço, a fim de melhorar a aderência.

3.4. CARREGAMENTO NO DESLOCAMENTO MÁXIMO PERMITIDO POR NORMA (L/250)

Ao aplicar a carga até atingir o deslocamento máximo estabelecido por norma, verifica-se que os grupos apresentaram disparidades nos valores de resistência apresentados na Tabela 2. O grupo A é, portanto considerado como referência para a análise e interpretação dos resultados em geral, por se tratar de vigas sem reforço. Dessa forma, os grupos B, C e D atingiram cargas maiores para o deslocamento máximo admissível (7,20 mm), sendo 36% superior do grupo B em relação ao grupo

A, do mesmo modo o grupo C apresentou um acréscimo de 23% e por fim o grupo D atingiu um carregamento de 14% maior para o deslocamento determinado.

Tabela 2: Resultados do carregamento no deslocamento máximo permitido por norma (L/250).

GRUPO A			GRUPO B			GRUPO C			GRUPO D		
Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)
A1	38,64	7,20	B1	58,08	7,20	C1	54,14	7,20	D1	37,31	7,20
A2	42,84	7,20	B2	56,89	7,20	C2	53,43	7,20	D2	51,19	7,20
A3	42,61	7,20	B3	53,32	7,20	C3	44,70	7,20	D3	53,17	7,20
<i>Média</i>	<i>41,36</i>	<i>-</i>		<i>56,10</i>	<i>-</i>		<i>50,76</i>	<i>-</i>		<i>47,22</i>	<i>-</i>
<i>Desvio Padrão</i>	<i>2,36</i>	<i>-</i>		<i>2,48</i>	<i>-</i>		<i>5,26</i>	<i>-</i>		<i>8,64</i>	<i>-</i>

Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

O maior incremento de cargas foi de 36%, inferior aos máximos 50% recomendados por Santos³ (2008, apud Ripper e Souza, 1998).

3.5. CARREGAMENTO E DESLOCAMENTO NA RUPTURA

O carregamento crescente e os deslocamentos atingidos na ruptura encontram-se dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados do carregamento e deslocamento para levar as vigas à ruptura.

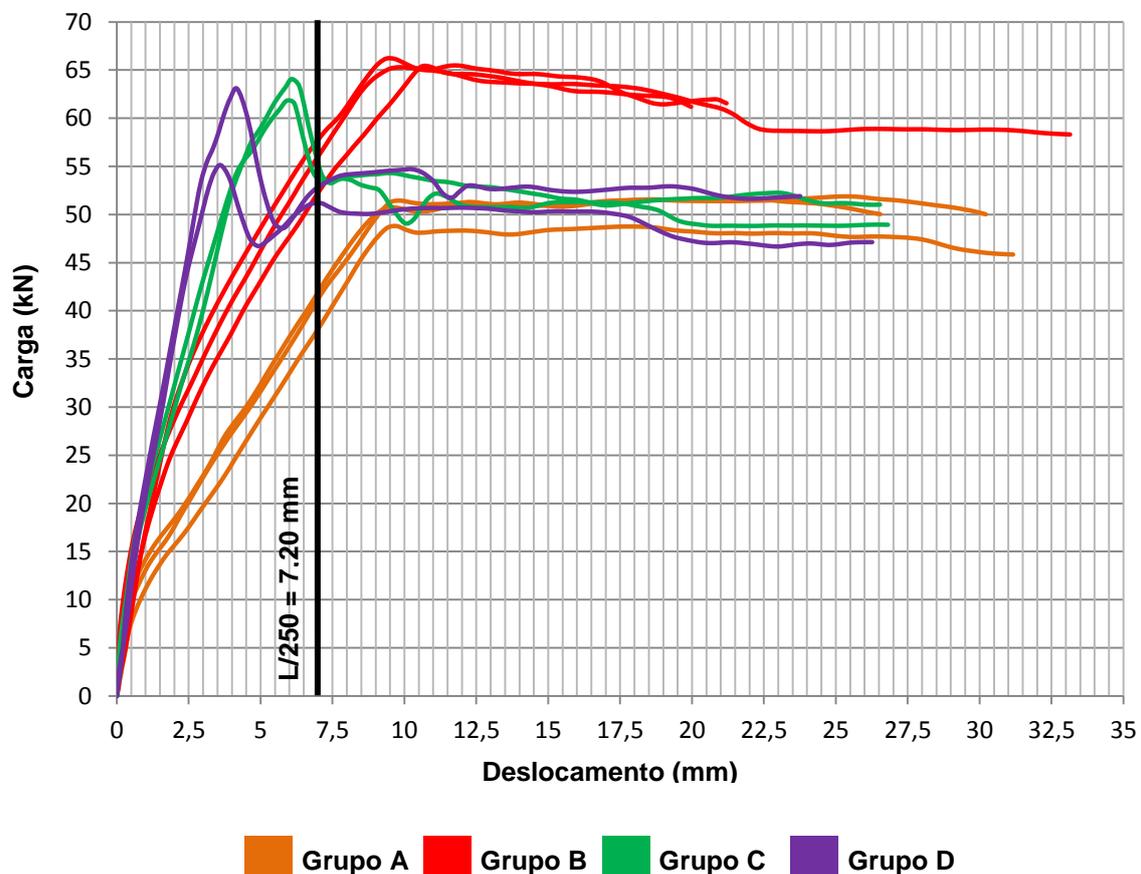
GRUPO A			GRUPO B			GRUPO C			GRUPO D		
Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)
A1	48,78	9,73	B1	66,18	9,37	C1	64,09	6,10	D1	-	-
A2	51,88	9,40	B2	65,30	9,80	C2	61,83	5,90	D2	55,14	3,61
A3	51,66	9,90	B3	65,41	10,62	C3	-	-	D3	63,05	4,19
<i>Média</i>	<i>50,77</i>	<i>9,68</i>		<i>65,63</i>	<i>9,93</i>		<i>62,96</i>	<i>6,00</i>		<i>59,10</i>	<i>3,90</i>
<i>Desvio Padrão</i>	<i>1,73</i>	<i>0,25</i>		<i>0,48</i>	<i>0,64</i>		<i>1,60</i>	<i>0,14</i>		<i>5,59</i>	<i>0,41</i>

Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

Nesta etapa, o comportamento dos percentuais que justificam o aumento da capacidade portante entre os grupos, foram semelhantes ao deslocamento máximo permitido por norma ($L/250$). O grupo B atingiu um carregamento 29% superior ao grupo A, já os deslocamentos obtidos foram próximos entre esses dois grupos. Porém, os deslocamentos finais para os grupos C e D, foram abaixo da determinação normativa, pois as vigas atingiram ruptura de forma brusca momentos antes de superar o deslocamento admissível (7,20 mm), entretanto antes de romper, as mesmas já haviam ultrapassado o limite de fissuras. Quanto ao carregamento, o grupo C foi 24% mais elevado em comparação ao grupo A, assim como o grupo D que foi de 16%. O comportamento dos ensaios na íntegra com os determinados instantes de aplicação de carga podem ser visualizados na Figura 8.

Na Figura 8, o eixo x representa os valores de deslocamento (mm) e o eixo y os valores de carregamento crescentes aplicados (kN).

Figura 8: Resultados do deslocamento para levar as vigas à ruptura *versus* carregamento.



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

Observa-se até 5 kN, que o deslocamento das vigas é praticamente nulo por causa da não fissuração, aumentando consideravelmente logo após este momento e transformando-se em uma reta, para os grupos A e B, ou seja, durante este período o deslocamento é diretamente proporcional a carga aplicada, esta constatação muda quando as vigas atingem a ruptura em 50,77 kN no grupo A e 65,63 kN para o grupo B. Após a ruptura das vigas, mantém-se a resistência até haver o esmagamento do concreto na região comprimida. Entre esses dois primeiros grupos A e B, nota-se a eficiência do reforço metálico na região tracionada e a rigidez do sistema quando comparado aos dois últimos grupos.

As vigas dos grupos C e D, não obtiveram a mesma tendência no gráfico, chegando a ruptura em 62,96 kN no grupo C e 59,10 kN no grupo D. Esses dois grupos contrariaram os ensaios anteriores, outro fator foi a ruptura do reforço idêntica ao estudo de (Tisot², 2010, p.70), a forma brusca que ocorreu em uma das extremidades das vigas, arrancando consigo uma porção de concreto com a chapa de aço colada que chegava até a armadura positiva, essas rupturas aconteceram antes de que fosse atingido o limite do deslocamento admissível. As imagens das vigas, estão apresentadas para melhor demonstrar as fissuras e comportamento durante a realização dos ensaios, no item 3.7 deste estudo.

3.6. RELAÇÃO ESPESSURA DAS CHAPAS DE AÇO SAE 1020 VERSUS CARGA NA RUPTURA

A Figura 9 apresenta no eixo x os valores de espessura (mm) e no eixo y os valores de carga (kN). Pode-se observar no gráfico, que com o aumento das espessuras das chapas de aço SAE 1020, diminui a carga de suporte das vigas, ou seja, é um comportamento linear decrescente.

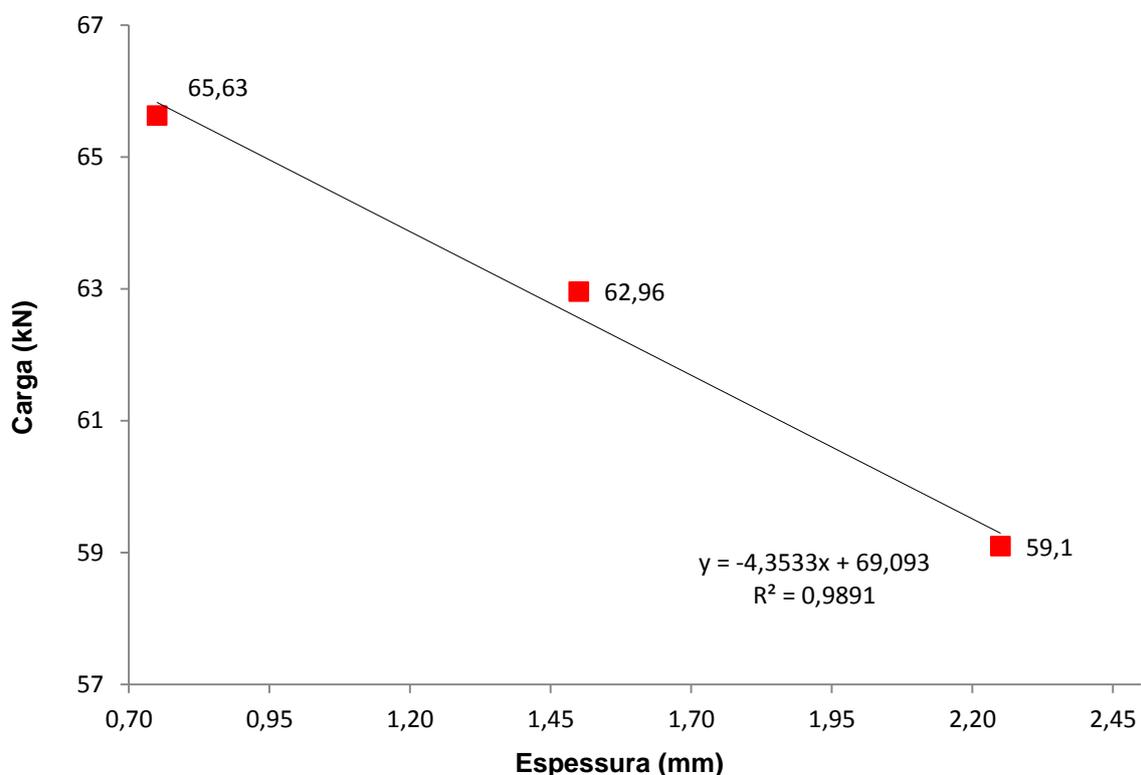
Este fato pode ser uma analogia, entre tensão e resistência, e fator de intensidade de tensões e tenacidade à fratura, como alega Fortes⁷ (2003, p. 26):

A frente da ponta de uma trinca aguda existe uma restrição lateral à deformação plástica, que aumenta com o aumento da espessura da placa. Essa restrição pode ser descrita como uma inibição do escoamento plástico devido à triaxialidade de tensões. O grau de inibição é diretamente relacionado ao grau de triaxialidade, isto é, o grau ao quais as tensões σ_x e σ_z aproximam-se do valor da tensão σ_y . Se as três tensões de referência forem iguais, teremos a restrição absoluta, de modo que não haverá escoamento plástico. Essa condição não é atingida porque o sistema de

tensões resulta em um valor maior para σ_y e por isso o escoamento flui na direção de carregamento.

Uma solução a ser adotada nesta situação, é a introdução de chumbadores nas extremidades das chapas de aço SAE 1020 coladas, que ajudaria a dissipar o acúmulo de tensões nessa região.

Figura 9: Comportamento de espessuras das chapas de aço SAE 1020 (mm) *versus* carga (kN).



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

3.7. COMPORTAMENTO DE FISSURAÇÃO

As fissuras foram avaliadas apenas por critério visual entre os grupos que estão representados na Figura 10.

O grupo A, teve um comportamento próximo do grupo B com aparecimento de fissuras entre os terços médios, vale ressaltar, o não desprendimento da chapa de aço SAE 1020 de 0,75 mm.

Os grupos C e D obtiveram também um comportamento semelhante entre eles, com fissuras mais acentuadas, até a extremidade do reforço. Observa-se também, o arrancamento do concreto com a chapa até a armadura de combate à flexão, situação descrita no item 3.5 deste estudo.

Figura 10: Fissuras - (a) Grupo A; (b) Grupo B; (c) Grupo C e (d) Grupo D.



Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Realizou-se a análise estatística Anova (Análise de Variância) para verificar se os grupos A, B, C e D apresentaram resultados distintos, no que se refere:

- (a) Carregamento para atingir o deslocamento máximo permitido por norma (L/250);
- (b) Carregamento máximo para levar as vigas à ruptura;
- (c) Deslocamento no carregamento de ruptura.

A análise de variância permite que os grupos sejam comparados simultaneamente. Seu princípio é comparar a média e a dispersão dos dados entre grupos de amostras (vigas) com a dispersão observada dentro dos mesmos. As Tabelas 4, 5 e 6 mostram as análises realizadas pelo *software* Microsoft Office Excel®.

Tabela 4: Anova fator único - carregamento para atingir o deslocamento máximo permitido por norma (L/250).

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
Grupo A	3,000	124,090	41,363	5,576		
Grupo B	3,000	168,290	56,097	6,136		
Grupo C	3,000	152,270	50,757	27,638		
Grupo D	3,000	141,670	47,223	74,686		

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	344,536	3,000	114,845	4,028	0,051	4,066
Dentro dos grupos	228,072	8,000	28,509			
Total	572,609	11,000				

Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

Tabela 5: Anova fator único - carregamento máximo para levar as vigas à ruptura.

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Grupo A	3,000	152,320	50,773	2,992
Grupo B	3,000	196,890	65,630	0,230
Grupo C	3,000	176,870	58,957	49,357
Grupo D	3,000	170,210	56,737	32,327

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	338,851	3,000	112,950	5,321	0,026	4,066
Dentro dos grupos	169,812	8,000	21,227			
Total	508,664	11,000				

Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

Tabela 6: Anova fator único - deslocamento no carregamento de ruptura.

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Grupo A	3,000	29,030	9,677	0,065
Grupo B	3,000	29,790	9,930	0,403
Grupo C	3,000	14,170	4,723	4,900
Grupo D	3,000	12,030	4,010	0,120

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	89,532	3,000	29,844	21,752	0,000	4,066
Dentro dos grupos	10,976	8,000	1,372			
Total	100,508	11,000				

Fonte: Caroline Crozeta Deghenhard, 2013.

A análise estatística mostrou que apenas para o carregamento no deslocamento máximo permitido por norma (L/250), os resultados foram iguais estatisticamente e nos demais testes (b) e (c) mostraram que os valores foram estaticamente diferentes. Para serem significativamente diferentes, F (em amarelo) terá que ser maior que F crítico (em vermelho).

5. CONCLUSÕES

Referente ao estudo realizado pode-se chegar as seguintes conclusões:

- A resistência à compressão axial ($f_{ckest} = 26,78$ MPa) foi superior ao valor estimado da resistência característica ($f_{ck} = 25,00$ MPa), conforme recomenda a NBR 12655:2006⁸;

- O ensaio piloto foi essencial para melhorar a aderência nas chapas de aço SAE 1020 coladas pelo método proposto;
- Para o carregamento no deslocamento máximo permitido por norma (L/250), os grupos B, C e D obtiveram acréscimo de 36%, 23% e 14% respectivamente, nos valores de carga para atingir o deslocamento admissível (7,20 mm) em comparação ao grupo A, que consiste em vigas sem reforço;
- Para o carregamento ao levar as vigas à ruptura, os grupos seguiram a mesma tendência de acréscimo na resistência quando comparado ao grupo A, sendo 29% superior o grupo B, 24% para o grupo C e 16% o grupo D;
- As médias dos deslocamentos na ruptura foram equivalentes entre os grupos A e B de 9,80 mm e para os grupos C e D de 4,95 mm, nota-se para esses dois últimos grupos o fato de as vigas romperem antes do deslocamento máximo admissível (7,20 mm);
- Os resultados mostraram que os esforços resistentes após o reforço não foram superiores a 50%, situação ideal conforme indica a literatura;
- O comportamento espessura (mm) *versus* carga (kN) indicou uma linearidade decrescente, ou seja, a partir do momento que aumentou a espessura da chapa de aço SAE 1020, obteve-se uma menor resistência;
- A análise de variância (Anova) mostrou que para o carregamento máximo permitido por norma (L/250), os grupos são estatisticamente iguais, já para o carregamento e deslocamento na ruptura, os mesmos apresentaram valores distintos;
- Por fim, o método de aplicação do reforço de chapas de aço SAE 1020 coladas com adesivo estrutural epóxi EP da marca Bautech[®], mostrou-se de fácil e rápida aplicação, apresentando boa eficiência e resultando no aumento da capacidade portante das vigas sujeitas a flexão. Ressalta-se também, que o grupo B, apresentou resultados mais significativos, diante dos demais grupos.

Com relação a trabalhos futuros sugere-se:

- Realizar experimentos comparando métodos de reforço estrutural diferentes no mercado ou criando novos sistemas que permitam o aumento da resistência das vigas;
- Melhorar a aderência das chapas de aço SAE 1020 na interface resina-aço para a metodologia desenvolvida, ou até mesmo inserir chumbadores nas extremidades das chapas, onde há um acúmulo de tensões;
- Proporcionar um estudo de viabilidade econômica para a aplicação do reforço.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

⁵ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2007.

⁶_____. **NBR 5739: Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

⁸_____. **NBR 12655: Concreto - controle, preparo e recebimento**. Rio de Janeiro, 2006.

¹DE SOUZA, Vicente Custódio Moreira; RIPPER, Thomaz - **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1998. 255 p.

⁷FORTES, Cleber. **Mecânica da fratura**. 2003. 74p.

⁴PIMENTA, 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.

³SANTOS, Paulo Mascarenhas. **Comparação de reforço com chapas de aço e fibras de carbono em vigas de concreto armado submetida à flexão simples**. Feira de Santana, 2008. 61p.

²TISOT, Guilherme Di Domenico. **Reforço à flexão de vigas de concreto armado submetidas a carregamento precoce**. Rio Grande do Sul, 2010. 130p.