



Análise experimental de distintas configurações de chapa metálica no reforço à flexão em vigas de concreto armado

C. C. Deghenhard¹, T. Teixeira¹, A. Vargas¹, M. Vito¹, Â. C. Piccinini¹, B. Do Vale Silva¹

¹ Departamento de Engenharia Civil; Laboratório Experimental de Estruturas (LEE); Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) - Criciúma/SC; Brasil.

Información del artículo

DOI:

http://dx.doi.org/10.21041/ra_v6i2.138

Artículo recibido el 30 de noviembre de 2015, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 20 de febrero de 2016.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2017 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2016.

© 2016 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 6, No. 2, Mayo – Agosto 2016., es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385939,

alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.revistaalconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-01171730300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de última modificación: 30 de mayo de 2016.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMO

O reforço estrutural externo com chapa metálica colada com adesivo epóxi é uma opção que possibilita aumentar a capacidade de carga em elementos de concreto armado. Este trabalho avaliou experimentalmente vigas de concreto armado com reforço de chapas de aço SAE 1020 de diferentes espessuras (0,75; 1,50 e 2,25 mm), comprimentos (80 e 150 cm) e configurações (perfil U ou simplesmente plana) com intuito de revisar e comparar as melhores práticas de reforço estrutural com chapa colada. Foram fabricadas 21 vigas com seções transversais de 12x20 cm e comprimento de 200 cm, utilizando concreto C25 e armadura de flexão com 2 Ø10 mm. As vigas foram submetidas a ensaios de flexão em 4 pontos, o que permitiu analisar as cargas últimas e deslocamentos verticais. Como resultado, apresenta-se um comparativo de desempenho das vigas.

Palavras-chave: Reforço estrutural; chapa de aço colada; vigas de concreto armado.

ABSTRACT

The external structural reinforcing steel, in the way of steel sheets attached with epoxy adhesive, is an option to increase the load capacity of reinforced concrete elements. This study evaluated concrete beams reinforced with steel sheets SAE 1020 of different thicknesses (0.75, 1.50, and 2.25 mm), longitudes (80 and 150 cm), and configurations (U-shape or flat) with the purpose of reviewing and comparing the best practices with sheets adhered to the structural reinforcement. Twenty-one beams were built with a cross-section of 12 x 20 cm and a longitude of 200 cm, with C25 concrete, and flexion frame with 2 Ø10 mm. The beams where subject to a four-point flexural test, which allowed analyzing the optimal loads and vertical displacements. Thus, a comparison relative to the performance of the beams is presented.

Keywords: structural reinforcement; cast steel plates; reinforced concrete beams.

RESUMEN

El acero de refuerzo estructural externo, a través de chapas de acero pegadas con adhesivo epóxico, es una opción para incrementar la capacidad de carga de elementos de concreto reforzado. En este estudio se evaluaron vigas de concreto reforzadas con chapas de acero SAE 1020 de diferentes espesores (0.75, 1.50 y 2.25 mm), longitudes (80 and 150 cm) y configuración (en forma de U o plana) con el propósito de revisar y comparar las mejores prácticas con chapas pegadas al refuerzo estructural. Se elaboraron 21 vigas construidas con una sección trasversal de 12 x 20 cm y una longitud de 200 cm, con concreto C25 y armadura de flexión con 2 Ø10 mm. Las vigas fueron sometidas a ensayos de flexión en 4 puntos, lo que permitió analizar las cargas últimas y desplazamientos verticales. Como resultado, se presenta una comparación relativa al desempeño de las vigas.

Palabras clave: refuerzo estructural; placas de acero coladas, vigas de concreto reforzado.

Autor de contacto: Bruno do Vale Silva (dovalesilva@unesc.net)

1. INTRODUÇÃO

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. Para garantir a estabilidade das construções, em alguns casos, há necessidade de reabilitação ou reforço estrutural (Silva Filho e Helene, 2011; Jumaat e Alam, 2008). Definido esse ponto, passa-se então à escolha da técnica adequada, que inclui a cuidadosa seleção dos materiais e equipamentos a serem empregados e a mão de obra necessária para a execução do serviço. O reforço caracteriza-se como uma atividade específica para os casos em que se deseja aumentar a resistência e/ou rigidez de uma estrutura. (Helene, 2000; Alfaiate e Costa, 2004; Tisot, 2010).

O reforço por adição externa de chapas metálicas coladas é caracterizado pela união da superfície de concreto à 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 quando não é possível fazer grandes alterações na geometria da peça (Campagnolo et al., 1994; Santos, 2008; Aykac et al., 2013). No final do processo tem-se um elemento estrutural composto por concreto-resina-aço, o que possibilita à estrutura uma resistência maior aos esforços solicitantes. 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 devidamente preparadas (Cánovas, 1998; Cánovas, 1985). A colagem das chapas metálicas é feita com resinas de epóxi porque apresentam adequado módulo de rigidez, excelentes propriedades adesivas com o concreto e o aço e baixa retração durante o processo de cura, garantindo a integridade da superfície de ligação (Melo Júnior, 1997; Patiño, 2005; Simões, 2007).

A aderência entre concreto-resina-aço é primordial para o bom funcionamento do reforço, pois proporciona a transferência de esforços entre os elementos. Estudos realizados mostram variadas soluções para prevenir tipos de ruptura por falha de aderência e destacamento da chapa, exemplo: aumento na relação largura/espessura da chapa; término das chapas nas proximidades dos apoios; utilização de chumbadores e outros dispositivos para ancoragem das chapas (Oehlers, 1990; Hussain, 1995; Ali, 2005; Simões, 2007; Narayananurthy, 2012). Outro fator importante para melhorar a durabilidade do reforço é realizar um tratamento com pintura anticorrosiva nas superfícies externas da chapa que não ficaram em contato com a resina epóxi. (Souza e Ripper, 1988). Dentro desse contexto, a escolha de configurações e técnicas adequadas são de fundamental importância para o bom desempenho mecânico do reforço estrutural (Perelles et al, 2013), além de proporcionar uma melhor relação custo/benefício no processo de reabilitação da estrutura.

O presente estudo tem como objetivo avaliar experimentalmente a capacidade portante de vigas de concreto armado com diferentes configurações de reforço metálico com chapas de aço SAE 1020: i) diferentes espessuras (0,75 mm, 1,50 mm e 2,25 mm), (ii) comprimentos (80 cm e 150 cm) e (iii) perfil U ou simplesmente plana. O intuito final é de revisar e comparar as melhores práticas de reforço estrutural com chapa colada.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foram moldadas 21 vigas com seções transversais de 12x20 cm e comprimento de 200 cm, concreto com resistência média à compressão de 25 MPa aos 28 dias e para a armadura de flexão foi utilizado aço CA-50 com $2\varnothing 5$ mm (domínio 3 - $x/d = 0,2893$). Os estribos empregados possuíam $\varnothing=5$ mm e espaçamento de 10 cm. A Figura 1 mostra o detalhamento empregado nas vigas.

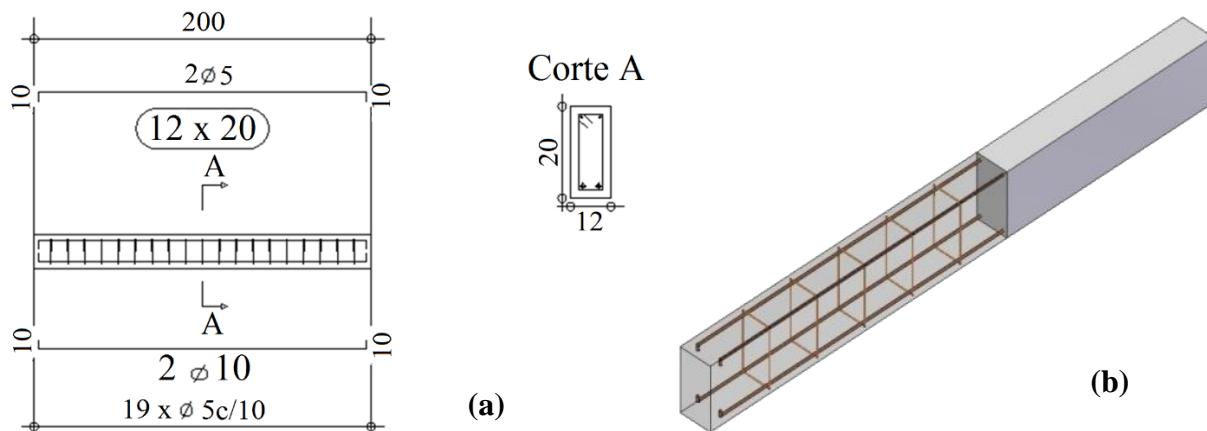


Figura 1. Detalhamento das armaduras nas vigas - (a) Detalhamento longitudinal; (b) Perspectiva da armação.

As vigas foram concretadas com auxílio de vibradores de imersão, sendo utilizados espaçadores plásticos com 2,5 cm para garantir o cobrimento da armadura. A Figura 2 mostra a sequência da fabricação das vigas.



Figura 2. Fabricação das vigas de concreto armado - (a) Formas com armação prontas para concretagem; (b) Concretagem e adensamento com vibradores de imersão; (c) Nivelamento do concreto nas formas.

O processo de desforma das vigas foi aos 7 dias. Aos 28 dias as vigas foram submetidas a ensaios de flexão em 4 pontos, o que permitiu analisar as cargas últimas e deslocamentos verticais. Para o controle da resistência à compressão do concreto foram moldados 12 corpos de prova (cps) cilíndricos ($\varnothing 10 \times 20$ cm) para serem rompidos aos 7 e 28 dias (3 cps por idade/ 2 concretagens) e para verificar a trabalhabilidade do concreto foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump-test*). As vigas foram divididas em 7 grupos com 3 amostras cada, conforme mostra a Tabela 1. As vigas dos grupos A, B, C e D foram fabricadas na mesma concretagem e as vigas do grupos E, F e G em outra betonada. As vigas dos grupos A e E foram adotadas como referência para cada betonada. A partir do resultado mais satisfatório entre as espessuras de chapa dos grupos B, C e D foram preparadas as vigas dos grupos E, F e G.

Tabela 1. Divisão dos grupos das vigas de concreto armado.

Vigas de referência sem reforço.	Vigas com chapas retas com espessuras diferentes.	Vigas com chapas perfil U com comprimentos diferentes.
Grupo A	Grupo B (0,75 mm)	Grupo F (150 cm)
Grupo E	Grupo C (1,50 mm)	Grupo G (80 cm)
-	Grupo D (2,25 mm)	-

2.1 Aplicação do reforço - 1^a etapa: chapas retas com espessuras diferentes.

Para efetuar o reforço estrutural foram utilizadas chapas de aço SAE 1020 com largura de 12 cm e comprimento de 150 cm. 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 e rendimento de aproximadamente 0,7 kg/m².

Antes da aplicação do adesivo, foram feitas 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 eventualmente existente fosse expulso. Essa 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 e encoberto por lona plástica. A aplicação do adesivo estrutural epóxi nas vigas principais foi realizada aos 21 dias, e o ensaio instrumentado de flexão aos 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 3.



Figura 3. (a) Preparo das chapas; (b) Aplicação do adesivo estrutural epóxi; (c) Fixação e escoramento das chapas.

2.2. Aplicação do reforço - 2^a etapa: perfil de aço "U" com mesma espessura.

A partir dos resultados obtidos com os ensaios dos grupos B, C e D, as vigas dos grupos F e G foram preparadas e reforçadas com perfil de aço SAE 1020 com 12 cm de base, abas com altura de 15 cm e espessura de 0,75 mm (formato perfil "U"), sendo que o grupo F apresentava 150 cm de comprimento e o grupo G apresentava 80 cm de comprimento. A diferença no comprimento das

chapas foi proposital para avaliar a área de maior concentração de esforços, que se encontra justamente nos pontos de aplicação da carga, ou seja, no terço central da viga.

O adesivo utilizado foi o mesmo descrito no item 2.1. A aplicação pode ser acompanhada na Figura 4, e foi efetuada conforme especificações do fabricante, para os dois comprimentos do perfil: (i) execução de ranhuras na superfície de aço para uma melhor aderência entre o perfil e a superfície de concreto; (ii) superfície de concreto limpa e isenta de pó, graxa, óleo, desmoldantes ou qualquer substância que possa afetar a adesão, efetuada com auxílio de uma escova de aço; (iii) mistura dos componentes A (resina) e B (endurecedor), feita durante 5 minutos; (iv) aplicação do adesivo epóxi nas vigas com espessura mínima de 2 mm; (v) colocação de grampos (sargentos) para que o perfil de aço ficasse pressionado e o mais justo possível junto à viga, favorecendo assim a aderência do perfil ao concreto. Este sistema foi mantido por 7 dias.



Figura 4. (a) Aplicação do adesivo epóxi para ancoragem dos perfis de aço; (b) Colocação de grampos; (c) Sistema de fixação final das chapas.

2.3. Ensaio de flexão em 4 pontos.

Conforme pode ser observado na Figura 5, as vigas estão posicionadas sob um pórtico metálico, onde a carga foi aplicada por meio de um cilindro hidráulico, com capacidade de 500 kN, transferidos para os terços médios da viga através de perfil metálico, apoiado sobre 2 roletes. Os valores de incremento de carga ao longo do ensaio foram obtidos a partir de uma célula de carga posicionada na base do cilindro. Os deslocamentos no vão central da viga foram medidos a partir de 2 transdutores indutivos de deslocamento (LVDTs) com capacidade de leitura de 100 mm, os quais foram posicionados em lados opostos no vão central da viga com intuito de se obter a média dos valores para uma melhor consideração do deslocamento central da viga. Para aquisição dos dados foi utilizado o sistema Quantum X® que utiliza o software Catman Easy®, ambos da marca HBM.

As verificações foram feitas para analisar o comportamento de cada grupo em diferentes instantes de aplicação de carga: (i) no deslocamento máximo ($L/250$), permitido pela norma ABNT NBR 6118:2014; (ii) na carga de ruptura; (iii) destacamento da chapa e modo de ruptura.

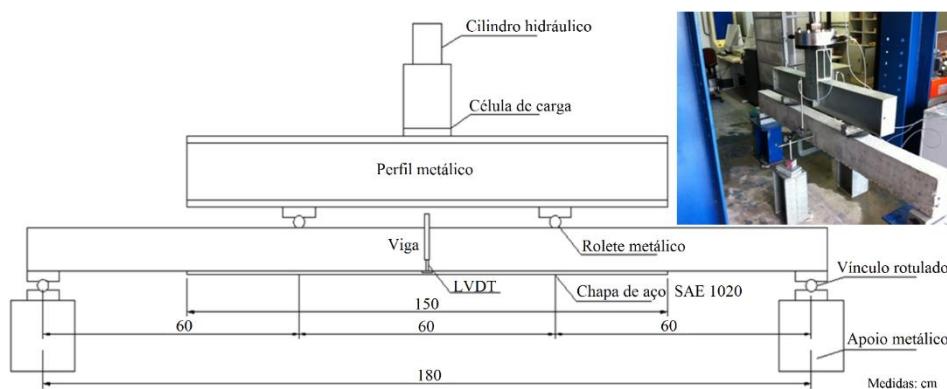


Figura 5. Desenho esquemático e foto do ensaio de flexão em quatro pontos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado do abatimento de tronco de cone foi de 11,0 cm para betonada dos grupos A, B, C e D e 10,0 cm para betonada dos grupos E, F, G. Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial, de acordo com a ABNT 5739:2007, estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados de resistência à compressão dos corpos de provas de cada grupo de vigas.

Grupos	Idade (dias)	Corpos de prova	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	Desvio padrão
A, B, C e D	7	1	21,5	21,2	2,0
		2	23,0		
		3	19,1		
	28	4	24,1	25,2	1,3
		5	26,5		
		6	25,0		
E, F e G	7	7	18,1	21,4	3,0
		8	24,0		
		9	22,0		
	28	10	30,0	29,7	1,8
		11	27,8		
		12	31,3		

3.1 Resultados - 1^a etapa: chapas retas com espessuras diferentes.

Ao aplicar a carga até atingir o deslocamento máximo estabelecido pela norma ABNT NBR 6118:2014, verificou-se que os grupos apresentaram disparidades nos valores de resistência conforme apresentados na Tabela 3. O grupo A é a 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 médias 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 30% e por fim o grupo D atingiu um carregamento de 26% maior para o deslocamento determinado.

Tabela 3. Resultados do carregamento no deslocamento máximo permitido por norma (L/250).

Grupo	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)
A	A1	38,6	7,2
	A2	42,8	7,2
	A3	42,6	7,2
	Média	41,4	-
	Desvio padrão	2,4	-
B	B1	58,1	7,2
	B2	56,9	7,2
	B3	53,3	7,2
	Média	56,1	-
	Desvio padrão	2,5	-
C	C1	54,1	7,2
	C2	53,4	7,2
	C3	-	7,2

	Média	53,8	-
	Desvio padrão	0,5	-
D	D1	-	7,2
	D2	51,2	7,2
	D3	53,2	7,2
	Média	52,2	-
	Desvio padrão	1,4	-

O maior acréscimo de cargas foi de 36%, inferior ao máximo de 50% recomendado por Souza e Ripper (1998). O carregamento crescente e os deslocamentos atingidos na ruptura estão dispostos na Tabela 4. 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 os dois grupos. Porém, os deslocamentos finais para os grupos C e D se apresentaram abaixo da determinação normativa, pois as vigas atingiram ruptura de forma brusca momentos antes de superar o deslocamento admissível (7,20 mm). 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 6.

Tabela 4. Resultados do carregamento e deslocamento para levar as vigas à ruptura.

Grupo	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)
A	A1	48,8	9,7
	A2	51,9	9,4
	A3	51,7	9,9
	Média	50,8	9,7
	Desvio padrão	1,7	0,3
B	B1	66,2	9,4
	B2	65,3	9,8
	B3	65,4	10,6
	Média	65,6	9,9
	Desvio padrão	0,5	0,6
C	C1	64,1	6,1
	C2	61,8	5,9
	C3	-	-
	Média	63,0	6,0
	Desvio padrão	1,6	0,1
D	D1	-	-
	D2	55,1	3,6
	D3	63,1	4,2
	Média	59,1	3,9
	Desvio padrão	5,6	0,4

As vigas dos grupos C e D não apresentaram a mesma tendência no gráfico (Figura 6), chegando a ruptura em 62,96 kN no grupo C e 59,10 kN no grupo D. Nesses dois grupos, a ruptura do reforço ocorreu de forma brusca 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 ($L/250$).

As imagens das vigas estão apresentadas na Figura 7 para melhor demonstrar o destacamento das chapas e o modo de ruptura durante a realização dos ensaios.

Os grupos A e B apresentaram comportamentos semelhantes no que se refere ao aparecimento de fissuras entre os terços médios e o não destacamento da chapa de aço SAE 1020 de 0,75 mm. Os grupos C e D apresentaram comportamentos similares entre eles, em relação as fissuras mais acentuadas, até a extremidade do reforço e o arrancamento do concreto com a chapa até a armadura de combate à flexão. Considerando os resultados não satisfatórios dos grupos C e D, uma solução a ser adotada é a introdução de chumbadores nas extremidades das chapas de aço SAE 1020 coladas, que ajudaria a dissipar o acúmulo de tensões nessa região. Na Figura 8 pode-se observar que com o aumento das espessuras das chapas de aço SAE 1020, ocorre a diminuição da carga de suporte das vigas, ou seja, é um comportamento linear decrescente.

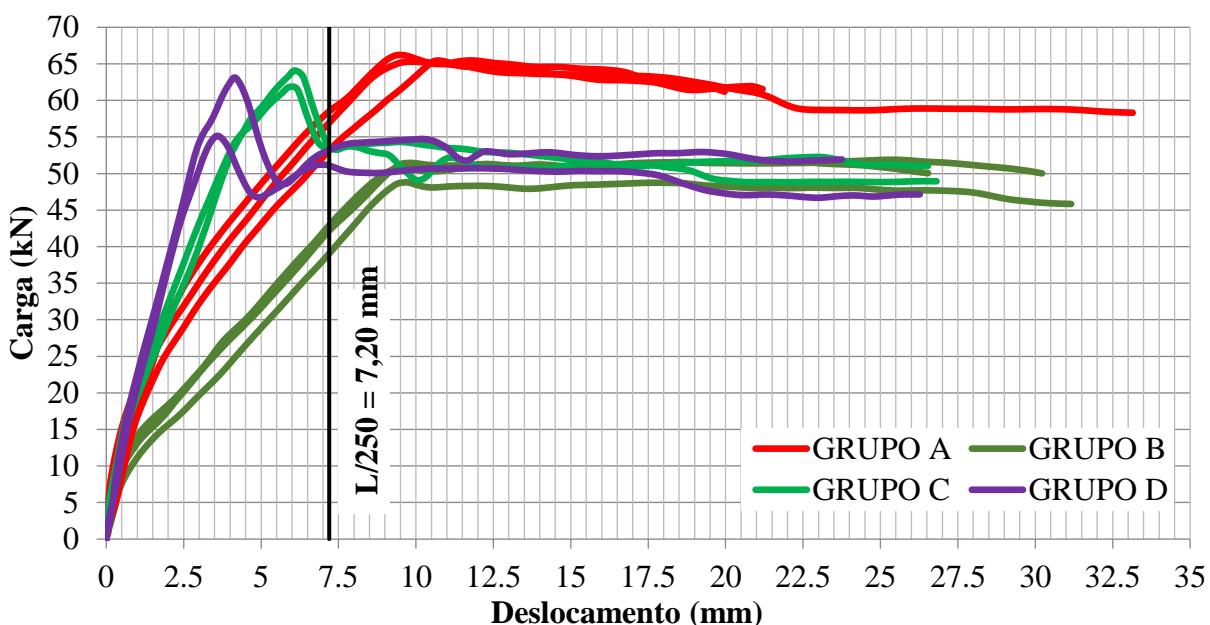


Figura 6. Comportamento das vigas dos grupos A, B, C e D - carga vs deslocamento.

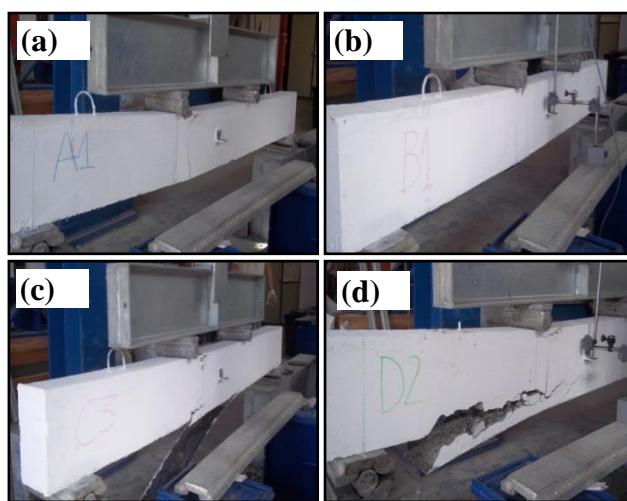


Figura 7. Modo de ruptura - (a) Grupo A; (b) Grupo B; (c) Grupo C e (d) Grupo D.

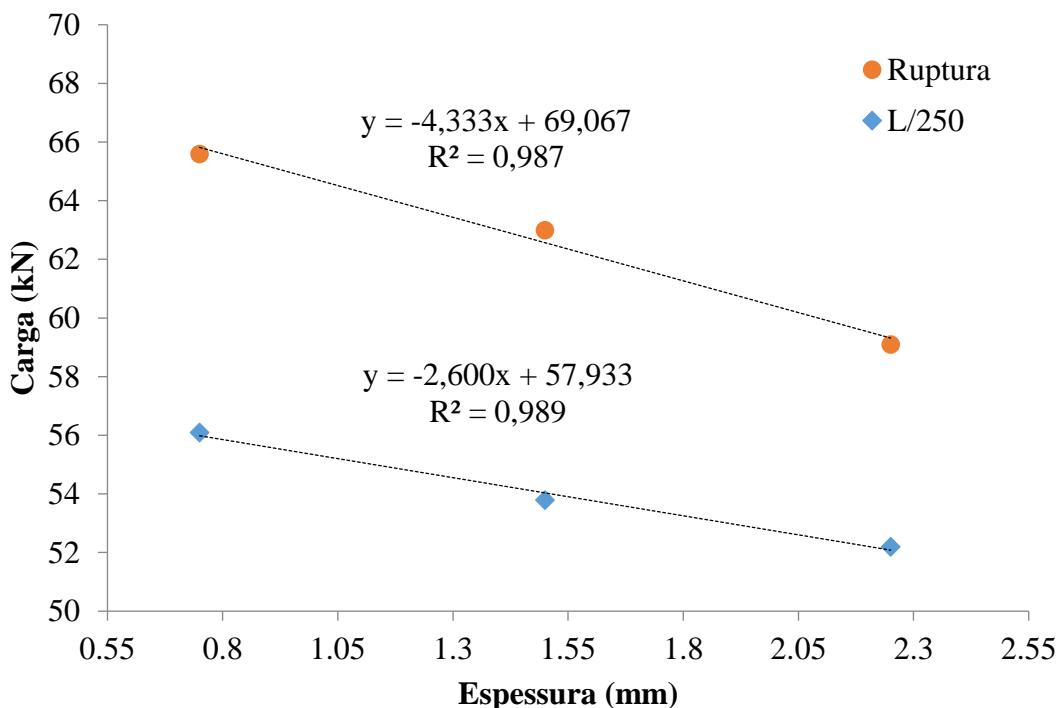


Figura 8. Comportamento das vigas dos grupos B, C e D - carga de ruptura e carga em L/250 vs espessuras das chapas de aço.

3.2. Resultados - 2^a etapa: chapas com perfil U de mesma espessura.

No carregamento no deslocamento máximo permitido por norma (L/250), o grupo F apresentou 20% de acréscimo na média dos valores em relação ao grupo E (referência), enquanto que o grupo G apresentou um acréscimo médio de 16% (Tabela 5). Nota-se que o grupo reforçado com o perfil de maior comprimento (Grupo F) apresentou maior eficiência quanto à resistência para atingir o deslocamento de 7,2 mm.

No carregamento necessário para levar as vigas à ruptura (Tabela 6), observou-se um incremento de carga maior referente ao grupo F (150 cm). Tal grupo apresentou 14% de aumento de resistência, enquanto que o grupo G apresentou queda de resistência quando comparado ao grupo E (referência), sendo este valor expresso em 6%. A partir do gráfico da Figura 9 é possível observar o comportamento de cada grupo relacionando a carga e o respectivo deslocamento.

Tabela 5. Carregamento no deslocamento máximo permitido por norma (L/250).

GRUPO E			GRUPO F (150 cm)			GRUPO G (80 cm)		
Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)
E1	44,2	7,2	F1	43,0	7,2	G1	53,5	7,2
E2	46,0	7,2	F2	61,1	7,2	G2	51,1	7,2
E3	44,9	7,2	F3	57,6	7,2	G3	52,6	7,2
Média	45,0	-		53,9	-		52,4	-
Desvio padrão	0,9	-		9,6	-		1,2	-

Tabela 6. Resultados do carregamento e deslocamento para levar as vigas à ruptura.

GRUPO E			GRUPO F (150 cm)			GRUPO G (80 cm)		
Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)	Vigas	Carga (kN)	Flecha (mm)
E1	63,4	23,4	F1	61,0	28,7	G1	59,9	18,1
E2	66,3	17,8	F2	82,6	13,1	G2	60,4	11,9
E3	64,3	11,4	F3	77,3	12,6	G3	61,6	8,9
Média	64,6	17,5		73,6	18,1		60,6	13,0
Desvio padrão	1,5	6,0		11,3	9,2		0,9	4,7

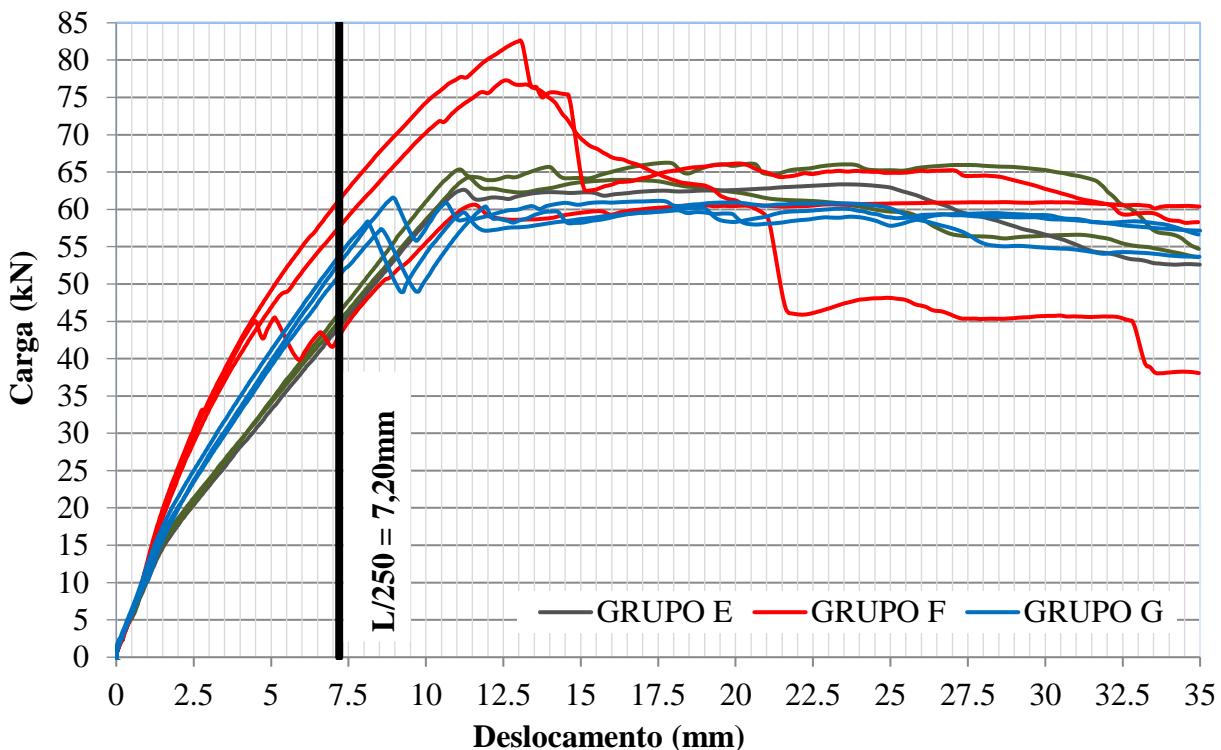


Figura 9. Comportamento das vigas dos grupos E, F e G - carga vs deslocamento.

Observa-se nitidamente o aumento da rigidez da viga com a adição da chapa de aço. Entretanto a viga F1 (Figura 10b) apresentou comportamento diferente das demais, pois houve o destacamento precoce da chapa de aço da viga, diminuindo o acréscimo de resistência do reforço, e posteriormente levando à ruptura com a carga de 60,97 kN, similarmente a viga de referência do grupo E. Tal fato pode ser resultado de uma provável má aplicação do adesivo epóxi, o que não proporcionou boa ancoragem do perfil metálico ao concreto.



Figura 10. Modo de ruptura - (a) Grupo E; (b) Grupo F e (c) Grupo G.

É possível notar a eficiência do reforço das vigas do grupo F (vigas F2 e F3), com o perfil de 150 cm, porém com cargas elevadas também ocorre o destacamento da chapa (Figura 9). As vigas do grupo B, com o perfil de 80 cm, apresentaram comportamento inferior ao grupo E (grupo de referência). Os deslocamentos médios foram semelhantes entre os grupos E e F, na média de 17,8 mm, enquanto que no grupo G o deslocamento foi em média de 13,0 mm. A viga F1 rompeu por flexão e destacamento do perfil de aço, seguida de esmagamento do concreto na região central da viga. Já as vigas F2 e F3 apresentaram fissuras por cisalhamento e também o rompimento por destacamento do perfil de aço, com o esmagamento do concreto no centro da viga F2 e na viga F3 na região próximo ao apoio. A análise feita das vigas do grupo G, reforçadas com o perfil de aço com 80 cm de comprimento, apresentaram comportamento de fissuras semelhante aos do grupo F: rompimento por destacamento do perfil de aço, sendo que, nas vigas G1 e G3, o arrancamento do concreto foi próximo à região central, e na viga G2, próximo ao apoio.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos conclui-se que:

- (i). O aumento da espessura do reforço com chapa de aço SAE 1020 proporcionou uma menor resistência à flexão das vigas, sendo que as espessuras de chapa com 1,50 mm e 2,25 mm provocaram destacamento da chapa no concreto antes do limite normativo de deslocamento em $L/250 = 7,2$ mm. Vale ressaltar que esse fato acarreta riscos para as implementações dessas espessuras de chapas. Entretanto pode-se dizer que a utilização de chapas retas com espessura de 0,75 mm é viável e de rápida execução, pois não houve necessidade de inserir pinos de ancoragem.
- (ii). A utilização do perfil com 150 cm propiciou um acréscimo da resistência de flexão, porém com ruptura por destacamento laterais da chapa com deslocamentos no vão central superiores a 7,20 mm ($L/250$). O uso do perfil com 80 cm se mostrou inviável devido ao destacamento precoce da chapa imediatamente após atingir o deslocamento central de 7,20 mm ($L/250$).
- (iii). De maneira geral pode-se dizer que a utilização de chapas coladas sem utilização de pinos de ancoragem é viável quando o objetivo é o aumento imediato da capacidade de suporte de vigas de concreto armado aliado ao baixo custo relativo desta configuração de reforço. Porém a eficiência dessa utilização está diretamente correlacionada a ancoragem das chapas para evitar a falha por destacamento. Vale salientar que parâmetros ligados a durabilidade, como a corrosão da chapa de aço e a estabilidade da resina epóxi, não foram levados em consideração nesta pesquisa, no entanto em uma aplicação real tais parâmetros devem ser rigorosamente considerados, principalmente em relações de custo/benefício para a efetiva segurança estrutural.

5. REFERÊNCIAS

- Alfaiate, J., Costa, R. (2004), "O refuerzo de vigas de betão armado com chapas metálicas coladas com resina", Métodos Computacionais em Engenharia, APMTAC, Portugal. pp. 1-13.
- Ali, M. S. M., Oehlers, D. J., Bradford, M. A. (2005) "Debonding of steel plates adhesively bonded to the compression faces of RC beams", Construction and Building Materials, V.19, No.6, pp. 413-422.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5739: *Concreto - ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2007.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6118: *Projeto de estruturas de concreto*. Rio de Janeiro, 2014.

- Aykac, S., Kalkan, I., Aykac, B., Karahan, S., Kayar, S. (2013), "Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Beams Using External Steel Plates", Journal of Structural Engineering, V.139, No.6, pp. 929–939.
- Campagnolo J. L; Campos Filho A., Silva Filho, L. C. P. (1994), "Técnicas de ancoragem em vigas de concreto armado reforzadas com chapas de acero coladas", In: 36a. REIBRAC - Reunión Anual do Instituto Brasileiro do Concreto, 1994, Porto Alegre/ RS.
- Cánovas M. F. (1998), "Patología e Terapia do Concreto Armado", São Paulo: Editora PINI, 522p.
- Cánovas, M. F. (1985), "Refuerzo de elementos estructurales de hormigón armado mediante encolado de bandas de acero con adhesivos epoxídicos", Informes de la Construcción, V.37, No. 373, pp. 27-38.
- Helene, P. R. L. (2000) "Manual para reparo, refuerzo e proteção de estruturas de concreto", 2 Ed, São Paulo: Editora PINI, 213 p.
- Hussain, M. (1995), "Flexural behavior of pre-cracked reinforced concrete beams strengthened externally by steel plates", ACI Structural Journal, V.92, No. 1, pp. 14-23.
- Jumaat, M. Z., Alam A. (2008), Experimental and analytical investigations on the structural behaviour of steel plate and CFRP laminate flexurally strengthened reinforced concrete beams", Journal of Applied Sciences, V.8, pp. 4383-4389.
- Melo Júnior, L. O. (1997), "Comportamento ao cisalhamento de vigas em concreto armado reforzadas com chapas de acero coladas lateralmente", Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE, 81p.
- Narayananamurthy, V., Chen, J. F., Narayananamurthy, J., Cairns, D.J., Oehlers, D.J. (2012) "Plate end debonding in the constant bending moment zone of plated beams", Composites Part B: Engineering, V.43, No. 8, pp. 3361-3373.
- Oehlers, D., Moran, J. (1990), "Premature failure of externally plated reinforced concrete beams", Journal of Structural Engineering, V.116, No. 4, pp. 978-995.
- Patiño, A. L. (2005) "Comportamiento mecánico de vigas de hormigón armado reforzadas con bandas encoladas con resinas epoxi", Tesis Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), 323p.
- Perelles, D. H., Medeiros, M. F., Garcez, M. R. (2013), "Aplicação da análise hierárquica como ferramenta de tomada de decisão para escolha do compósito de refuerzo com polímeros reforçados com fibras", Revista ALCONPAT, V.3, No. 3, pp. 165-180.
- Santos, P. M. (2008), "Comparação de refuerzo com chapas de acero e fibras de carbono em vigas de concreto armado submetida à flexión simples", Trabalho de Final de Curso em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), Feira de Santana/BA.
- Silva Filho L. C. P., Helene P. R. L. (2011), "Análises de estruturas de concreto com problemas de resistência e fissuração", In.: Isaia G. C., Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ª Edição. São Paulo: Editora IBRACON, V.2, Cap.32, pp. 1124-1174.
- Simões, M. L. F. (2007), "Refuerzo à flexión de vigas de concreto armado por encamisamento parcial", Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro/RJ, 162p.
- Souza, V. C. M., Ripper, T. (1988), "Patología, recuperación e refuerzo de estruturas de concreto", São Paulo: Editora PINI, 255 p.
- Tisot, G. D. D. (2010), "Refuerzo à flexión de vigas de concreto armado submetidas a carregamento precoce", Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil, Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo/RS.