



Análisis experimental de distintas configuraciones de chapa metálica en el refuerzo a flexión de 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.5219997385893, alconpat_int@gmail.com, Página Web: www.revistaalconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, 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.

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 transversal 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.

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.

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.

Autor de contato: Bruno do Vale Silva (dovalsilva@unesc.net)

1. INTRODUCCIÓN

La condición para los servicios de recuperación y refuerzos de las estructuras de concreto depende del Análisis preciso de las causas que los hace necesarios y el estudio detallado de los efectos producidos. Para garantizar la estabilidad de las construcciones, en algunos casos, hay necesidad de rehabilitación o refuerzo estructural (Silva Filho y Helene, 2011; Jumaat y Alam, 2008). Definido ese punto, se escoge la técnica adecuada, que incluye la cuidadosa selección de los materiales y equipos a utilizar y la mano de obra necesaria para la ejecución del trabajo. El refuerzo se caracteriza como una actividad específica para los casos en que se desea aumentar la resistencia y/o rigidez de una estructura. (Helene, 2000; Alfaiate y Costa, 2004; Tisot, 2010).

El refuerzo por adición externa de chapas metálicas coladas es caracterizado por la unión de la superficie de concreto con chapas de acero a través de una resina con alta capacidad de adhesión y resistencia mecánica. Es una opción para el refuerzo de elementos de concreto, de rápida y simple ejecución, recomendada principalmente cuando es necesario reforzar la estructura en un tiempo corto, o cuando no es posible hacer grandes alteraciones en la geometría de la pieza (Campagnolo et al., 1994; Santos, 2008; Aykac et al., 2013). Al final del proceso se tiene un elemento estructural compuesto por concreto-resina-acero, lo que provee a la estructura una resistencia mayor a los esfuerzos solicitantes. Como consecuencia se tiene un elemento más rígido que se deforma poco antes de iniciar el colapso. Es de fundamental importancia que la resina utilizada para hacer el contacto concreto-acero sea de calidad comprobada y la superficie del concreto y del acero sean debidamente preparadas (Cánovas, 1998; Cánovas, 1985). El pegado para hacer contacto de las chapas metálicas es hecho con resinas de epóxico porque presentan adecuado módulo de rigidez, excelentes propiedades adhesivas con el concreto y el acero y baja retracción durante el proceso de curado, garantizando la integridad de la superficie de contacto (Melo Júnior, 1997; Patiño, 2005; Simões, 2007).

La adherencia entre concreto-resina-acero es primordial para el buen funcionamiento del refuerzo, ya que proporciona la transferencia de esfuerzos entre los elementos. Estudios realizados muestran variadas soluciones para prevenir tipos de ruptura por falla de adherencia y separación de la chapa, ejemplo: aumento en la relación ancho/espesor de la chapa; acabado de las chapas en las cercanías a los apoyos; uso de pernos de anclaje y otros dispositivos para anclar a las chapas (Oehlers, 1990; Hussain, 1995; Ali, 2005; Simões, 2007; Narayanamurthy, 2012). Otro factor importante para mejorar la durabilidad del refuerzo es realizar un tratamiento con pintura anticorrosiva en las superficies externas de la chapa que no quedará en contacto con la resina epóxica. (Souza y Ripper, 1988). Dentro de ese contexto, la elección de las configuraciones y técnicas adecuadas son de fundamental importancia para el buen desempeño mecánico del refuerzo estructural (Perelles et al, 2013), además de proporcionar una mejor relación costo/beneficio en el proceso de rehabilitación de la estructura.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar experimentalmente la capacidad portante de vigas de concreto armado con diferentes configuraciones de refuerzo metálico con chapas de acero SAE 1020: i) diferentes espesores (0,75 mm, 1,50 mm e 2,25 mm), (ii) longitudes (80 cm e 150 cm) y (iii) perfil U o simplemente plana. La intención final es revisar y comparar las mejoras prácticas de refuerzo estructural con chapa colada.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Fueron vaciadas 21 vigas con secciones transversales de 12x20 cm y longitud de 200 cm, concreto con resistencia media a compresión de 25 MPa a los 28 días y para la armadura de flexión fue utilizado acero CA-50 con $2 \times \varnothing = 10$ mm (dominio 3 - $x/d = 0,2893$). Los estribos usados tenían $\varnothing=5$ mm y separación de 10 cm. La Figura 1 muestra en detalle usado en las vigas.

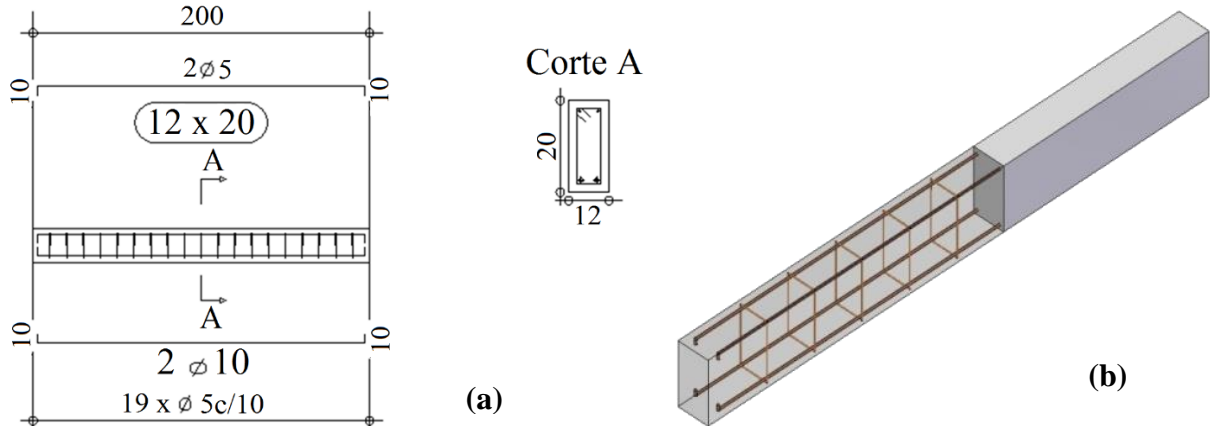


Figura 1. Detalle de las armaduras en las vigas - (a) Detalle longitudinal; (b) Perspectiva del armado

Las vigas fueron vaciadas con uso de vibradores de inmersión, siendo utilizados separadores plásticos de 2,5 cm para garantizar el recubrimiento de la armadura. La Figura 2 muestra la secuencia de fabricación de las vigas.



Figura 2. Fabricación de las vigas de concreto armado - (a) Moldes con armado listo para el vaciado; (b) Vaciado y vibrado; (c) Nivelación del concreto en los moldes.

El proceso de desencofrado de las vigas fue a los 7 días. A los 28 días las vigas fueron sometidas a ensayos de flexión en 4 puntos, lo que permitió analizar las cargas últimas y desplazamientos verticales. Para el control de la resistencia a compresión del concreto fueron vaciados 12 probetas (cps) cilíndricas ($\varnothing 10 \times 20$ cm) para ser ensayadas a los 7 y 28 días (3 cps por edad/ 2 vaciados) y para verificar la trabajabilidad del concreto fue realizado el ensayo de cono de Abram (*slump-test*). Las vigas fueron divididas en 7 grupos con 3 muestras cada una, según se muestra en la Tabla 1. Las vigas de los grupos A, B, C y D fueron fabricadas en el mismo vaciado de las vigas de los grupos E, F y G en otro vaciado. Las vigas de los grupos A y E fueron tomadas como referencia para cada vaciado. A partir del resultado más satisfactorio entre los espesores de chapa de los grupos B, C y D fueron preparadas las vigas de los grupos E, F y G.

Tabla 1. Distribución de los grupos de las vigas de concreto armado.

Vigas de referencia sin refuerzo.	Vigas con chapas rectas con espesores diferentes.	Vigas con chapas perfil U con longitudes 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 Aplicación del refuerzo - 1ª etapa: chapas rectas con espesores diferentes.

Para efectuar el refuerzo estructural fueron utilizadas chapas de acero SAE 1020 con ancho de 12 cm y longitud de 150 cm. El adhesivo estructural utilizado fue el EP, in bi-componente a base de epóxico de la marca Bautech®, con características de alta adhesión, resistencia química y mecánica, material pre-dosificado, impermeable al agua y aceite, además de dureza inicial en 12 horas y curado total en 7 días. La aplicación del adhesivo estructural epóxico en las vigas siguió las recomendaciones del suplidor, iniciando por la preparación del sustrato, en que la superficie de aplicación fue limpiada de polvo, aceites o cualquier sustancia que perjudique la adhesión, siendo ese procedimiento realizado con uso de cepillo de acero. La preparación del adhesivo estructural epóxico ocurrió por la homogenización de los componentes separados de forma manual. Luego, se adicionó el componente B (endurecedor) sobre el componente A (resina), mezclando por 5 minutos. La aplicación del adhesivo estructural epóxico fue realizado con auxilio de una espátula sobre toda la superficie a ser vaciada, con espesor mínima de 2 mm y rendimiento de aproximadamente 0,7 kg/m².

Antes de la aplicación del adhesivo, fueron hechas ranuras con una lijadora eléctrica en las chapas de acero, para mejorar las condiciones de adherencia junto con la superficie del concreto. Luego de fijar las chapas, se someten a una rápida presión uniforme, para que el exceso de resina eventualmente existente se elimine. Esa presión se hace con un martillo de goma. Posteriormente, se colocan bloques de concreto en los extremos y en la región de las chapas, sistema que se mantiene por 7 días y cubierto por lona plástica. La aplicación del adhesivo estructural epóxico en las vigas principales fue realizada a los 21 días, y el ensayo de flexión a los 28 días del vaciado. Las etapas de la preparación del sustrato, del adhesivo estructural epóxico, así como la aplicación de las chapas de acero en las vigas pueden verse en la Figura 3.



Figura 3. (a) Preparación de las chapas; (b) Aplicación del adhesivo estructural epóxico; (c) Fijación y apoyo de las chapas.

2.2. Aplicación del refuerzo - 2ª etapa: perfil de acero "U" con igual espesor.

A partir de los resultados obtenidos con los ensayos de los grupos B, C y D, las vigas de los grupos F y G fueron preparadas y reforzadas con el perfil de acero SAE 1020 con 12 cm de base, alas de altura de 15 cm y espesor de 0,75 mm (formato perfil "U"), siendo el grupo F con 150 cm de longitud y el grupo G 80 cm de longitud. La diferencia en la longitud de las chapas fue

premeditada para evaluar el área de mayor concentración de esfuerzos, que se encuentra justamente en los puntos de aplicación de la carga, es decir en el tercio central de la viga.

El adhesivo utilizado fue el mismo descrito en el ítem 2.1. La aplicación puede ser acompañada en la Figura 4, y fue efectuada conforme especificaciones del fabricante, para las dos longitudes del perfil: (i) ejecución de ranuras en la superficie de acero para una mejor adherencia entre el perfil y la superficie de concreto; (ii) superficie de concreto limpia y sin polvo grasa o aceite, o cualquier sustancia que pueda afectar la adhesión, realizada con ayuda de un cepillo de acero; (iii) mezcla de los componentes A (resina) y B (endurecedor), hecha durante 5 minutos; (iv) aplicación del adhesivo epóxico en las vigas con espesor mínimo de 2 mm; (v) colocación de fijadores (sargentos) para que el perfil de acero quede presionado lo más justo posible junto a la viga, favoreciendo la adherencia del perfil al concreto. Este sistema fue mantenido por 7 días.



Figura 4. (a) Aplicación del adhesivo epóxico para anclar los perfiles de acero; (b) Colocación de fijadores; (c) Sistema de fijación final de las chapas.

2.3. Ensayo de flexión en 4 puntos.

Como puede ser observado en Figura 5, las vigas están posicionadas sobre un pórtico metálico, donde la carga fue aplicada por medio de un cilindro hidráulico, con capacidad de 500 kN, transferidos para los tercios centrales de la viga a través del perfil metálico, apoyado sobre 2 rollos de madera. Los valores de incremento de carga a lo largo del ensayo fueron obtenidos a partir de una célula de carga posicionada en la base del cilindro. Los desplazamientos en el vano central de la viga fueron medidos a partir de 2 transductores inductivos de desplazamiento (LVDTs) con capacidad de lectura de 100 mm, los cuales fueron posicionados en lados opuestos en el vano central de la viga con intención de obtener la media de los valores para una mejor consideración del desplazamiento central de la viga. Para adquirir los datos se usó el sistema Quantum X® que utiliza el software Catman Easy®, ambos de la marca HBM.

Las verificaciones fueron hechas para analizar el comportamiento de cada grupo en diferentes instantes de aplicación de carga: (i) en el desplazamiento máximo ($L/250$), permitido por la norma ABNT NBR 6118:2014; (ii) en la carga de ruptura; (iii) separación de la chapa y modo de rotura.

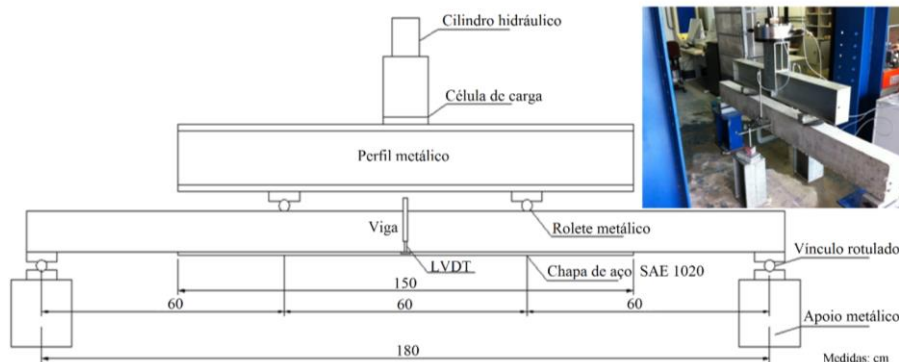


Figura 5. Dibujo esquemático y foto del ensayo de flexión en cuatro puntos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El resultado del asentamiento fue de 11,0 cm para el concreto de los grupos A, B, C y D y 10,0 cm para el concreto de los grupos E, F, G. Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión axial, de acuerdo con la ABNT 5739:2007, están indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de resistencia a la compresión de las probetas de cada grupo de vigas.

Grupos	Edad (días)	Probeta	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)	Desviación Estándar
A, B, C y 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 y 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 - 1ª etapa: chapas rectas con espesores diferentes.

Al aplicar la carga hasta llegar al desplazamiento máximo establecido por la norma ABNT NBR 6118:2014, se obtuvo que los grupos presentaron disparidades en los valores de resistencia según lo presentado en la Tabla 3. El grupo A es la referencia para el análisis e interpretación de los resultados en general por tratarse de vigas sin refuerzo. De esa forma, los grupos B, C y D alcanzaron cargas promedio mayores para el desplazamiento máximo admisible (7,20 mm), siendo 36% superior el grupo B en relación al grupo A. Igualmente, el grupo C presentó un incremento de 30% y el grupo D llegó a una carga 26% mayor para el desplazamiento determinado.

Tabla 3. Resultados de la carga en el desplazamiento 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
	Promedio	41,4	-
	Desviación estándar	2,4	-
B	B1	58,1	7,2
	B2	56,9	7,2
	B3	53,3	7,2
	Promedio	56,1	-
	Desviación estándar	2,5	-
C	C1	54,1	7,2
	C2	53,4	7,2
	C3	-	7,2

	Promedio	53,8	-
	Desviación estándar	0,5	-
D	D1	-	7,2
	D2	51,2	7,2
	D3	53,2	7,2
	Promedio	52,2	-
	Desviación estándar	1,4	-

El mayor incremento de cargas fue de 36%, inferior al máximo de 50% recomendado por Souza y Ripper (1998). La carga creciente y los desplazamientos alcanzados en la ruptura están dispuestos en la Tabla 4. En esta etapa, el comportamiento de los porcentajes que justifican el aumento de la capacidad portante entre los grupos fue semejante al desplazamiento máximo permitido por norma ($L/250$). El grupo B alcanzó una carga 29% superior al grupo A, y los desplazamientos obtenidos fueron próximos entre los dos grupos. Por tanto, los desplazamientos finales para los grupos C y D se presentan bajo la determinación normativa, pues las vigas alcanzan ruptura de forma brusca momentos antes de superar el desplazamiento admisible (7,20 mm). Cuando la carga, el grupo C fue 24% más elevado en comparación al grupo A, así como el grupo D, que fue de 16%. El comportamiento de los ensayos puede ser visualizado en la Figura 6.

Tabla 4. Resultados de carga y desplazamiento para llevar las vigas a ruptura.

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

Las vigas de los grupos C y D no tienen la misma tendencia en el gráfico (Figura 6), llegando a ruptura en 62,96 kN en el grupo C y 59,10 kN en el grupo D. En esos dos grupos, la ruptura del refuerzo ocurrió de forma brusca en una de las extremidades de las vigas, arrancando consigo una

porción de concreto con la chapa de acero colada, que llegaba hasta la armadura positiva. Esas rupturas ocurren antes de que fuese alcanzado el límite del desplazamiento admisible ($L/250$). Las imágenes de las vigas están en la Figura 7 para demostrar la separación de las chapas y el modo de ruptura durante la realización de los ensayos.

Los grupos A y B tienen comportamientos semejantes en lo que se refiere a la aparición de fisuras entre los tercios centrales y en la separación de la chapa de acero SAE 1020 de 0,75 mm. Los grupos C y D tienen comportamientos similares entre ellos, en relación a las fisuras más acentuadas, hasta la extremidad del refuerzo y el arrancamiento del concreto con la chapa hasta la armadura de combate a la flexión. Considerando los resultados no satisfactorios de los grupos C y D, una solución puede ser la introducción de pernos de anclaje en las extremidades de las chapas de acero SAE 1020 coladas, que ayudaría a disipar la acumulación de tensiones en esa región. En la Figura 8 se observa que con el aumento de los espesores de las chapas de acero SAE 1020, ocurre la disminución de la carga de soporte de las vigas, es decir, es un comportamiento lineal decreciente.

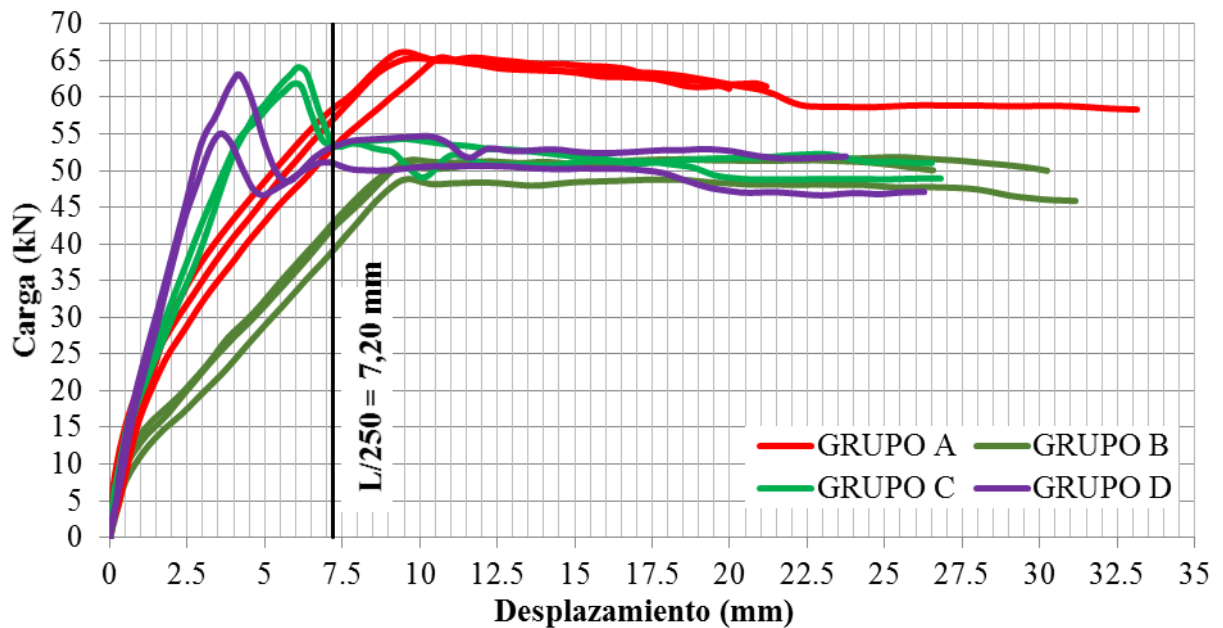


Figura 6. Comportamiento de las vigas de los grupos A, B, C y D - carga vs desplazamiento.

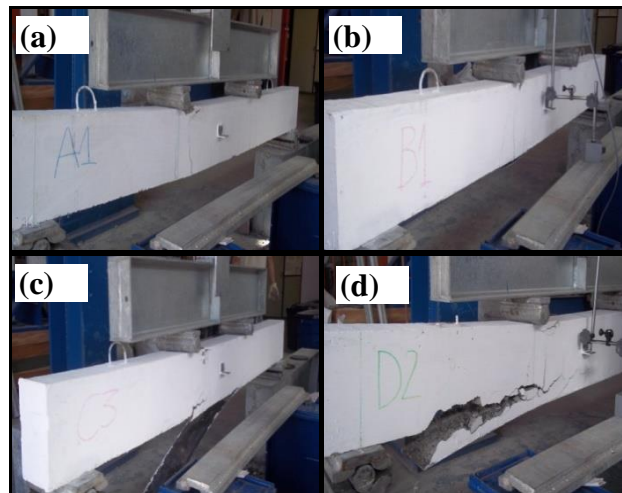


Figura 7. Modo de rotura - (a) Grupo A; (b) Grupo B; (c) Grupo C e (d) Grupo D.

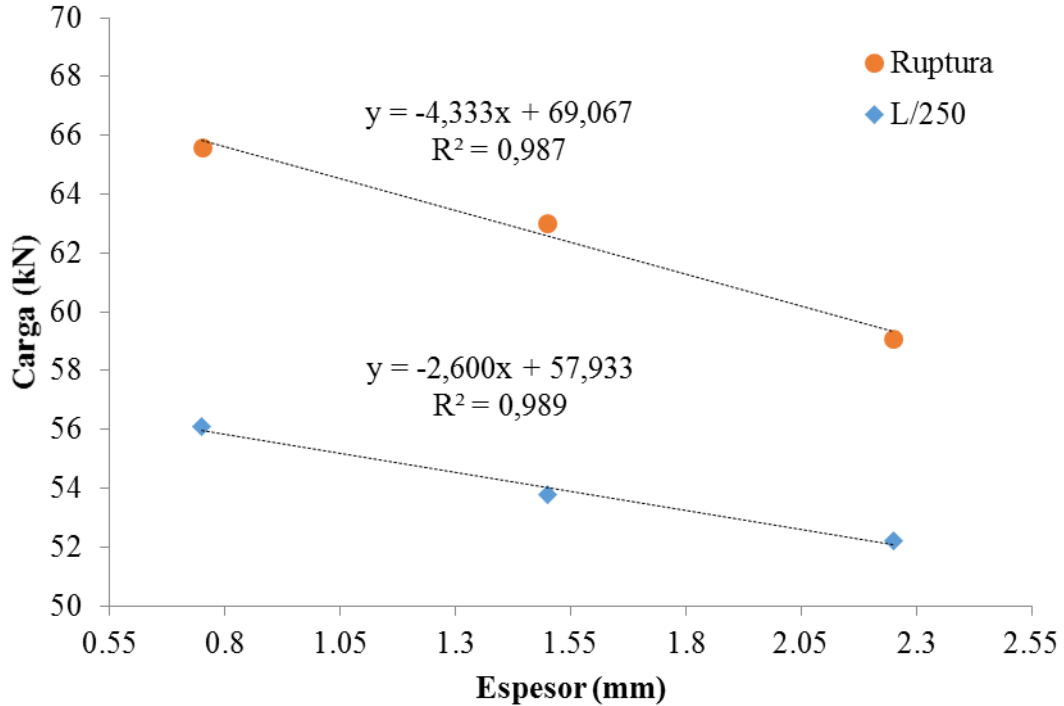


Figura 8. Comportamiento de las vigas de los grupos B, C y D - carga de ruptura y carga en L/250 vs espesores de las chapas de acero.

3.2. Resultados - 2ª etapa: chapas con perfil U de igual espesor.

En la carga el desplazamiento máximo permitido por norma (L/250), el grupo F tiene 20% de incremento en el promedio de los valores en relación al grupo E (referencia), mientras que el grupo G presentó un incremento promedio de 16% (Tabla 5). Se nota que el grupo reforzado con el perfil de mayor longitud (Grupo F) tiene mayor eficiencia cuando la resistencia para alcanzar el desplazamiento de 7,2 mm.

La carga necesaria para llevar las vigas a su ruptura (Tabla 6), tiene un incremento de carga mayor referente al grupo F (150 cm). Tal grupo tuvo 14% de aumento de resistencia, mientras que el grupo G disminuyó la resistencia cuando se compara al grupo E (referencia), siendo este valor de 6%. A partir del gráfico de la Figura 9 es posible observar el comportamiento de cada grupo relacionando la carga y el respectivo desplazamiento.

Tabla 5. Carga en el desplazamiento 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
Promedio	45,0	-		53,9	-		52,4	-
Desviación estándar	0,9	-		9,6	-		1,2	-

Tabla 6. Resultados de carga y desplazamiento para llevar las vigas a 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
Promedio	64,6	17,5		73,6	18,1		60,6	13,0
Desviación estándar	1,5	6,0		11,3	9,2		0,9	4,7

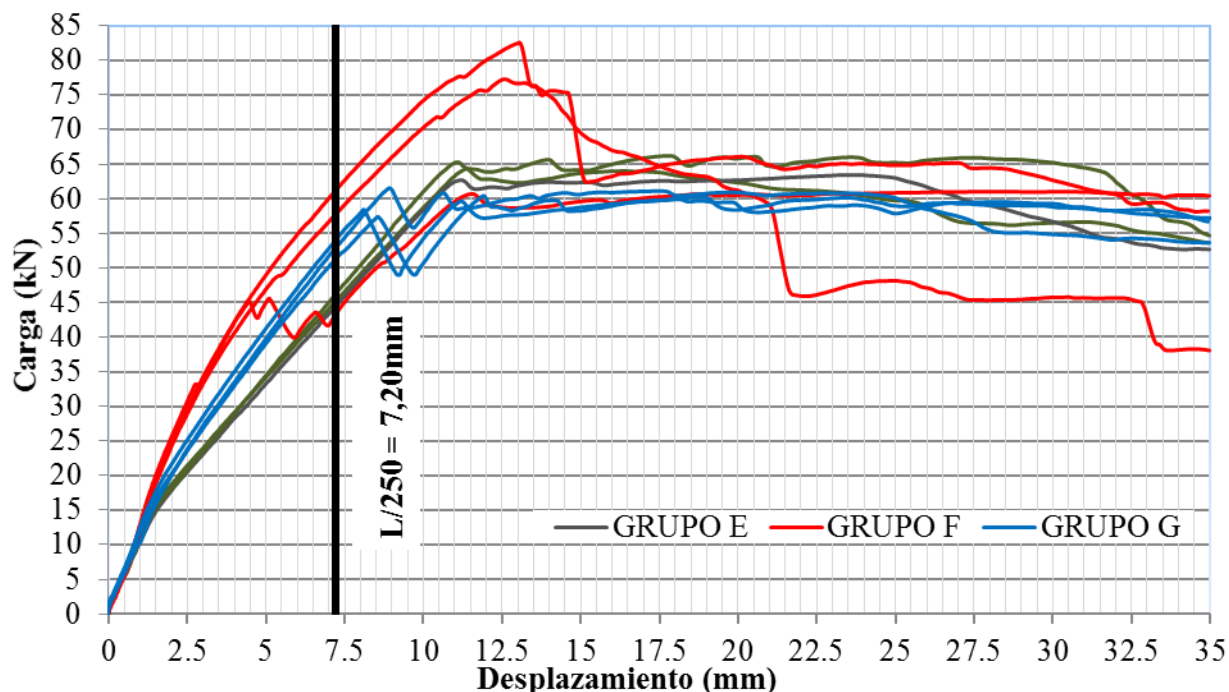


Figura 9. Comportamiento de las vigas de los grupos E, F y G - carga vs desplazamiento.

Se ve claramente el aumento de la rigidez de la viga con la adición de la chapa de acero. La viga F1 (Figura 10b) tiene un comportamiento diferente de las demás, pues tuvo la separación precoz de la chapa de acero de la viga, disminuyendo el incremento de resistencia del refuerzo, y posteriormente llevando a la ruptura con la carga de 60,97 kN, similarmente la viga de referencia del grupo E. Este hecho puede ser resultado de una probable mala aplicación del adhesivo epóxico, lo que no proporcionó buen anclaje del perfil metálico al concreto.

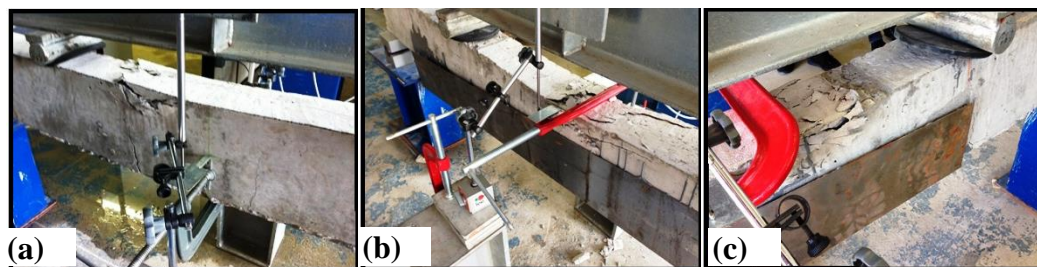


Figura 10. Modo de ruptura - (a) Grupo E; (b) Grupo F y (c) Grupo G.

Es posible notar la eficiencia del refuerzo de las vigas do grupo F (vigas F2 y F3), con el perfil de 150 cm, por tanto, con cargas elevadas también ocurre la separación de la chapa (Figura 9). Las vigas del grupo B, con el perfil de 80 cm, tuvieron un comportamiento inferior al grupo E (grupo de referencia). Los desplazamientos promedios fueron semejantes entre los grupos E y F, en promedio de 17,8 mm, mientras que en el grupo G el desplazamiento fue en promedio de 13,0 mm. La viga F1 se rompió por flexión y separación del perfil de acero, seguida de aplastamiento del concreto en la región central de la viga. Las vigas F2 y F3 tienen fisuras por cizallamiento y también rompimiento por separación del perfil de acero, con aplastamiento del concreto en el centro da viga F2 y en la viga F3 de la región próxima al apoyo. El Análisis hecho de las vigas del grupo G, reforzadas con el perfil de acero con 80 cm de longitud, tienen un comportamiento de fisuras semejantes a los del grupo F: rompimiento por separación del perfil de acero, siendo que, en las vigas G1 y G3, el arrancamiento del concreto fue próximo a la región central, y en la viga G2, próximo al apoyo.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se concluye que:

- (i). El aumento del espesor del refuerzo con chapa de acero SAE 1020 proporcionó una menor resistencia a flexión de las vigas, siendo que los espesores de chapa con 1,50 mm y 2,25 mm provocaron separación de la chapa en el concreto antes del límite normativo de desplazamiento en $L/250 = 7,2$ mm. Vale resaltar que ese hecho trae riesgos para la implementación de esos espesores de chapas. Entretanto se puede decir que el uso de chapas rectas con espesor de 0,75 mm es viable es de rápida ejecución, pues no hubo necesidad de insertar pernos de anclaje.
- (ii). El uso del perfil con 150 cm propició un incremento de la resistencia de flexión, por tanto, con ruptura por separación lateral de la chapa con desplazamientos en el vano central superiores a 7,20 mm ($L/250$). El uso del perfil con 80 cm se mostró inviable debido a la separación precoz de la chapa inmediatamente después de alcanzar el desplazamiento central de 7,20 mm ($L/250$).
- (iii). De manera general se puede decir que el uso de chapas coladas sin uso de pernos de anclaje es viable cuando el objetivo es el aumento inmediato de la capacidad portante de vigas de concreto armado además del bajo costo relativo de esta configuración de refuerzo. Por lo tanto, su eficiencia está directamente correlacionada al anclaje de las chapas para evitar la falla por separación. Se destaca que parámetros ligados a durabilidad, como la corrosión de la chapa de acero y la estabilidad de la da resina epóxica, no fueron llevados en consideración en esta pesquisa, sin embargo, en una aplicación real tales parámetros deben ser rigurosamente considerados, principalmente en relaciones de costo/beneficio para la efectiva seguridad estructural.

5. REFERENCIAS

- 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 reforçadas com chapas de acero coladas*", In: 36a. REIBRAC - Reunión Anual do Instituto Brasileiro do Concreto, 1994, Porto Alegre/ RS.
- Cánovas M. F. (1998), "*Patologia 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 reforçadas com chapas de acero coladas lateralmente*", Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife/PE, 81p.
- Narayanamurthy, V., Chen, J. F., Narayanamurthy, 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 reforçadas 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), "*Patologia, recuperação 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.