






Análisis experimental de vigas de hormigón armado reforzadas con barras de acero y adhesivo epoxi estructural

R. J. C. Silva^{1*} , M. B. S. Muniz¹ , F. E. S. da Silva Júnior² , É. M. F. Lima³ , C. V. dos S. Araújo⁴ 

*Autor de Contacto: ricardo.carvalho222@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.213>

Recepción: 08/01/2019 | Aceptación: 18/10/2018 | Publicación: 30/12/2018

RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo analizar la eficiencia del refuerzo en vigas de hormigón armado mediante la adición de barras de acero y adhesivo epoxi. Se produjeron cinco vigas. Cuatro recibieron refuerzo a flexión, y en dos de ellas fueron adicionadas también abrazaderas “U” para mejorar el anclaje del refuerzo. Los ensayos mostraron que las abrazaderas redujeron la resistencia de las vigas, en comparación con las que no tenían. Las vigas reforzadas sin abrazaderas obtuvieron mejores resultados, pero el factor limitante más importante fue la adherencia entre el epoxi y la viga. El uso de abrazaderas para intentar resolver el problema de la adherencia dio originalidad a esta investigación. Las conclusiones se basaron en la comparación entre las vigas ensayadas.

Palabras clave: reforzamiento; viga; hormigón armado; encamisado.

Citar como: R. J. C. Silva, M. B. S. Muniz, F. E. S. da Silva Júnior, É. M. F. Lima, C. V. dos S. Araújo (2019), “Análisis experimental de vigas de hormigón armado reforzadas con barras de acero y adhesivo epoxy estructural”, Revista ALCONPAT, 9 (1), pp. 65 – 78, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.213>

¹ Universidad Estatal de Vale do Acaraú, Sobral, Brasil

² Universidad Federal de Rio Grande, Rio Grande, Brasil

³ Universidad Federal de Ceará, Fortaleza, Brasil

⁴ Universidad de Brasilia, Brasília, Brasil

Información Legal

Revista ALCONPAT 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.alconpat.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.

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.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 2019.

Experimental analysis of reinforced concrete beams strengthened with steel bars and epoxy structural adhesive

ABSTRACT

This work was aimed at analyzing the efficiency of the strengthening of reinforced concrete beams with the addition of steel bars and epoxy adhesive. Five beams were produced, out of which four beams were strengthened to flexure. In two of them, “U” clips were also used to improve the anchorage of the strengthening. The tests demonstrated that the clips reduced the resistances of the beams compared to those without clips. The strengthened beams without clips yielded better results, but the largest limiting factor was the adherence between the epoxy and beam. The use of clips for solving the problem of adherence made this research original. The conclusions were based on the comparisons of the tested beams.

Keywords: strengthening; beam; reinforced concrete; jacketing.

Análise experimental de vigas de concreto armado reforçadas com barras de aço e adesivo estrutural epóxi

RESUMO

Esse trabalho objetivou analisar a eficiência do reforço com adição de barras de aço e adesivo epóxi em vigas de concreto armado. Foram produzidas cinco vigas. Quatro receberam reforço à flexão e em duas delas também foram utilizados grampos em “U” para melhorar a ancoragem do reforço. Os ensaios mostraram que os grampos reduziram a resistência das vigas em relação às sem grampos. As vigas reforçadas sem grampos obtiveram melhores resultados, sendo o maior limitador a aderência entre o epóxi e a viga. O uso dos grampos para tentar resolver o problema da aderência deram originalidade a essa pesquisa. As conclusões foram baseadas nas comparações entre as vigas ensaiadas.

Palavras-chave: reforço; viga; concreto armado; encamisamento.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de rehabilitar las estructuras de concreto reforzado puede surgir debido a la falta de mantenimiento durante su vida útil y su adaptación a nuevos usos cuando la opción de demolerlos y reconstruirlos no es viable. En este caso, se realizaron algunos estudios sobre el refuerzo de estructuras de concreto reforzado. Sin embargo, debido al desarrollo continuo en este tema de la ingeniería estructural, todavía no existe una metodología específica para analizar el comportamiento estructural de las vigas rehabilitadas.

Según Reis (Reis, 1998), el estudio intenso en investigación científica sobre el refuerzo y la rehabilitación de estructuras de concreto reforzado es muy importante. Esto se debe principalmente a definir mejor las reglas de diseño, comprender el comportamiento del refuerzo de las estructuras a lo largo del tiempo e identificar enfoques para analizar la adhesión entre los materiales y sus propiedades. Estos estudios permitirían determinar qué materiales, técnicas, procedimientos y reglas son más adecuados para ser utilizados durante la realización de la rehabilitación estructural. Por lo tanto, la literatura sobre el refuerzo de vigas de hormigón armado, como los documentos de Helene (Helene, 2000), Cheong y MacAlevey (Cheong y MacAlevey, 2000), Reis (Reis, 2003), Alfaiate y Costa (Alfaiate y Costa, 2004)., Altun (Altun, 2004), Santos (Santos, 2006), Lima (Lima, 2015) y Deghenhard et al. (Deghenhard et al., 2016) han sido extremadamente importantes para el avance de la investigación en esta área.

Aunque existen varias técnicas de refuerzo, este trabajo se centrará en el método de rehabilitación de vigas de concreto reforzado a través de la introducción de barras de acero y adhesivo estructural epoxi (revestimiento). El estudio de esta técnica, a pesar de ser anticuado, sigue siendo muy importante debido a dos razones simples. Primero, sigue siendo una técnica de refuerzo ampliamente utilizada para trabajos pequeños y medianos en Brasil. En segundo lugar, en esta investigación, se identificaron problemas serios con este tipo de refuerzo, que necesita mayor discusión.

El objetivo principal de este trabajo fue estudiar la rehabilitación de vigas de concreto reforzado mediante la adición de barras de acero y adhesivo estructural epoxi.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Características de las vigas

Para este estudio, el Grupo de Investigación de Estructuras y Materiales (GEM) de la Universidad Estatal de Vale do Acaraú (UVA) produjo cinco vigas de concreto reforzado, de las cuales cuatro fueron reforzadas y una viga se usó como referencia (no reforzada). Todas las vigas se produjeron con las mismas dimensiones: 80 cm de longitud (con un tramo de 60 cm), 15 cm de altura y 10 cm de ancho, como se muestra en la Figura 1.

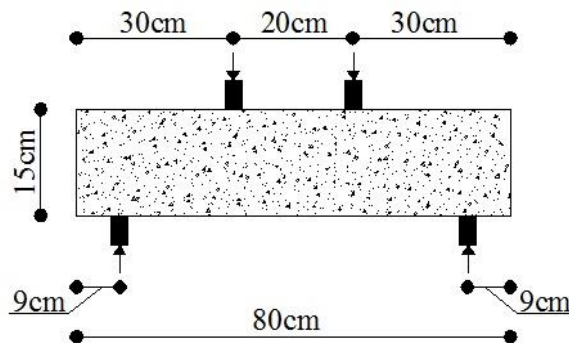


Figura 1. Dimensiones de las vigas probadas.

La viga de referencia no se reforzó y se denota como Viga E1. Las otras vigas (E2, E3, E4 y E5) fueron reforzadas por diferentes enfoques. Todas las vigas tenían dos barras de refuerzo longitudinales con un diámetro de 6.3 mm y doce refuerzos transversales (estribos) con un diámetro de 6.3 mm y una separación de 6.4 cm. Esta disposición de barras de refuerzo se eligió para que la falla de las vigas pudiera deberse a la flexión. La Figura 2 muestra los detalles del refuerzo de las cinco vigas.

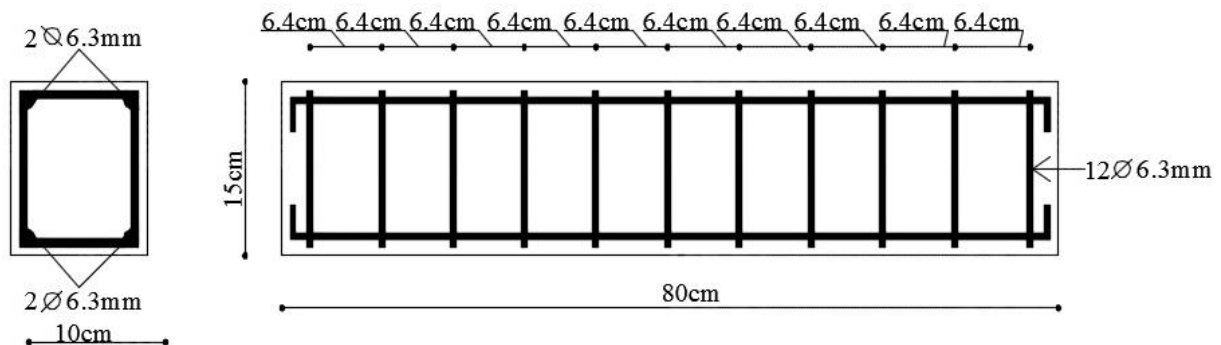


Figura 2. Detalles del refuerzo de las vigas.

La viga E2 se reforzó para flexionar con la inserción de dos barras de ϕ 6.3 mm y 50 cm de longitud en un "diente" formado con adhesivo epoxi (Figura 3).

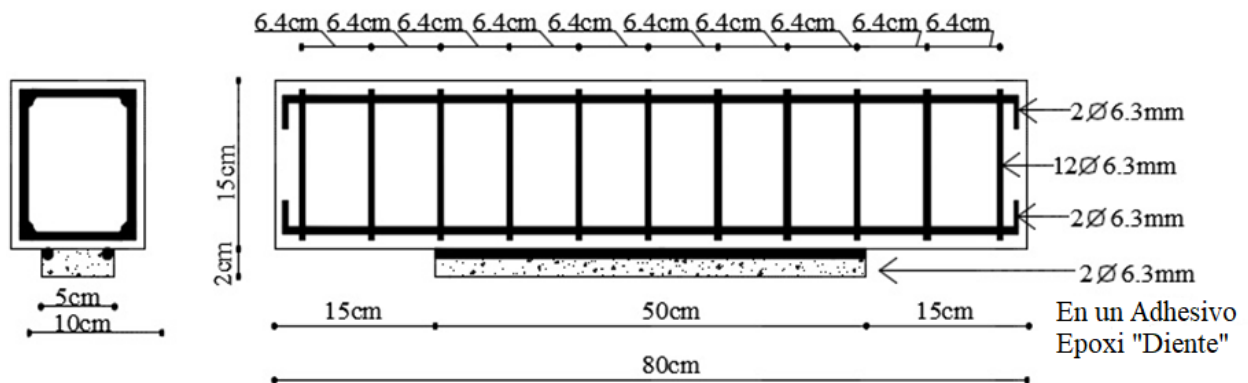


Figura 3. Detalles del refuerzo de la viga E2.

La viga E3 también se reforzó para flexionar con la inserción de dos barras de ϕ 6.3 mm y 50 cm de longitud en un "diente" formado con adhesivo epoxi. Para mejorar el anclaje de las barras de refuerzo al sustrato de la viga, se insertaron siete clips en forma de "U" de 7 cm de altura y 4.5 cm de ancho (ver más adelante en la Figura 7), que penetraron 5.5 cm en la viga (Figura 4).

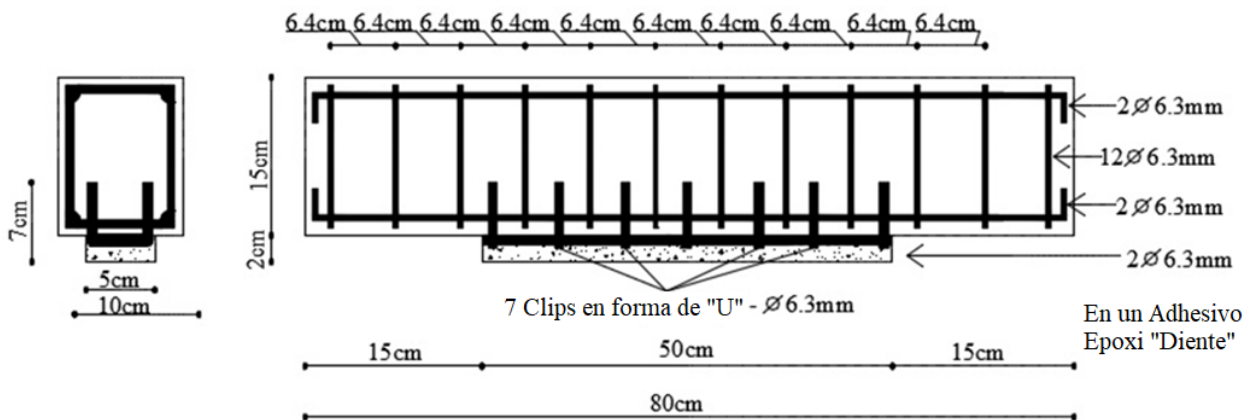


Figura 4. Detalles del refuerzo de la viga E3.

La viga E4 se reforzó para flexionar con la inserción de dos barras de ϕ 6.3 mm y 30 cm de longitud en un "diente" hecho con adhesivo epoxi. Los tamaños de estas barras se redujeron para permanecer casi completamente dentro de la región de flexión pura (Figura 5).

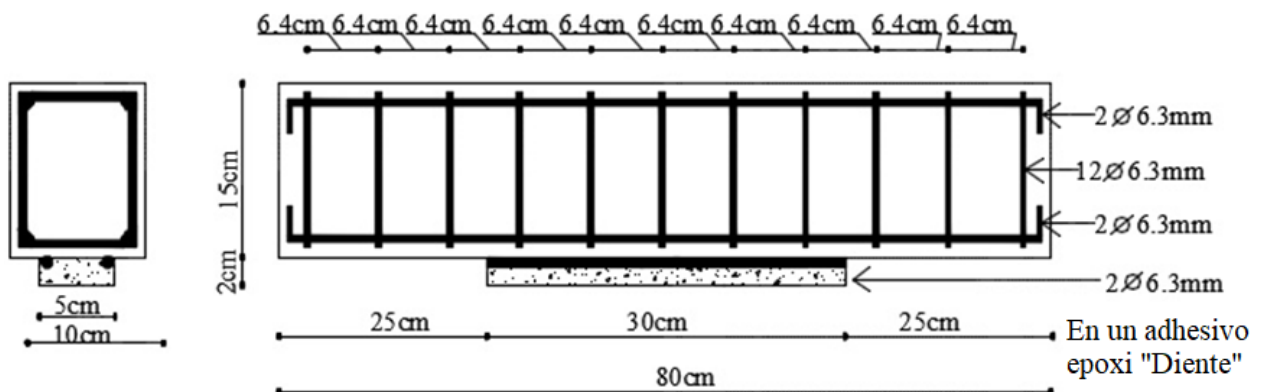


Figura 5. Detalles del refuerzo de la viga E4.

La viga E5 también se reforzó para flexionar con la inserción de dos barras de ϕ 6.3 mm y 30 cm de longitud en un "diente" formado con adhesivo epoxi. Como en la viga E4, los tamaños de estas barras se redujeron para que permanezcan prácticamente completamente dentro de la región de flexión pura (Figura 6). En la viga E5, para mejorar el anclaje de las barras de refuerzo al sustrato, se insertaron cuatro clips en forma de "U" con 7 cm de altura y 4.5 cm de ancho (según la Figura 7), que penetraron 5.5 cm en la viga (Figura 6).

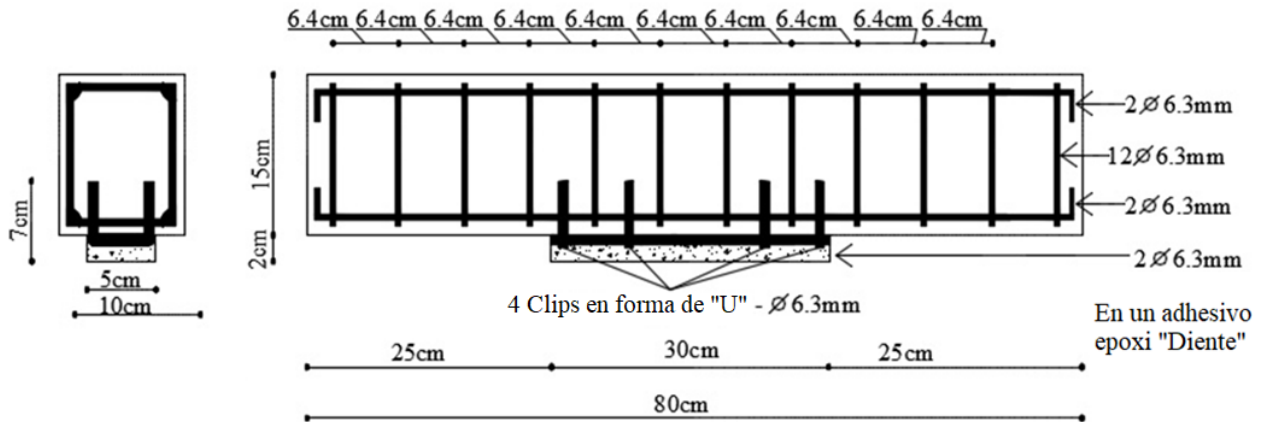


Figura 6. Detalles del refuerzo de la viga E5.

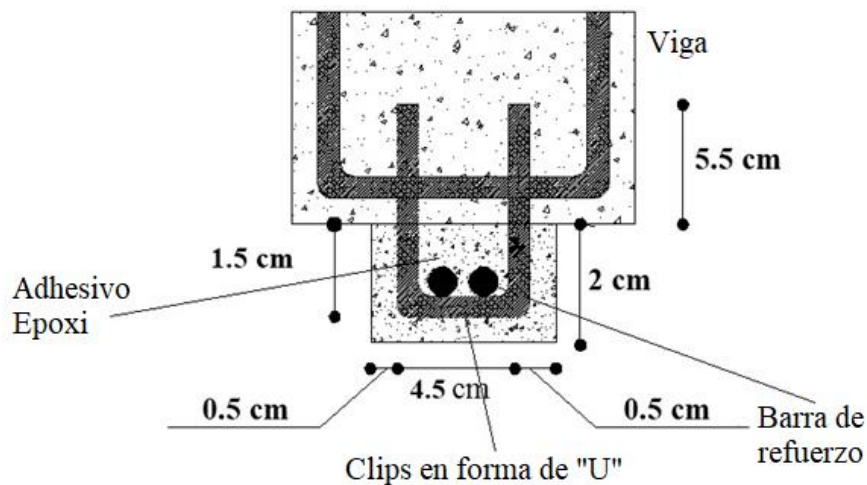


Figura 7. Detalles del clip insertado en las vigas E3 y E5 para ayudar en el anclaje entre el refuerzo y la viga.

La resistencia final a la compresión del hormigón (f_c) se obtuvo mediante una prueba de compresión axial de las muestras cilíndricas el mismo día de las pruebas de las vigas, y logró una resistencia promedio de 34.91 MPa. La resistencia máxima a la tracción del hormigón (f_t) se obtuvo mediante la prueba de tracción indirecta de muestras cilíndricas (prueba brasileña), en el mismo día de las pruebas de las vigas, y logró una resistencia promedio de 3.13 MPa. Las pruebas para obtener la resistencia a la compresión y la tracción del hormigón se realizaron de acuerdo con NBR 5739 (ABNT – NBR5739, 2007) y NBR 7222 (ABNT – NBR7222, 2011). La Tabla 1 enumera las características de las vigas probadas.

Tabla 1. Características de las vigas probadas.

Vigas	Refuerzo	Refuerzo inferior	Estribos	f_y (MPa)	E_s (GPa)	f_c (MPa)	f_t (MPa)	E_{cs} (MPa)
E1	Sin refuerzo	2 ϕ 6.3 mm	12 ϕ 6.3 mm	500	210	34.91	3.20	29357.64
E2	2 ϕ 6.3 mm Longitud = 50 cm							
E3	2 ϕ 6.3 mm + 7U Longitud = 50 cm							
E4	2 ϕ 6.3 mm Longitud = 30 cm							
E5	2 ϕ 6.3 mm + 3U Longitud = 30 cm							
f_y = Límite de rendimiento del acero según el fabricante; E_s = Módulo de elasticidad del acero según el fabricante; f_c = Resistencia promedio a la compresión del concreto en la fecha de la prueba; f_t = Resistencia promedio a la tracción del concreto en la fecha de la prueba; E_{cs} = Módulo de elasticidad secante del concreto calculado por NBR6118 (ABNT - NBR6118, 2014).								

Si bien las vigas analizadas tenían dimensiones reducidas en comparación con las vigas reales, es necesario enfatizar que el objetivo de este trabajo no fue determinar ninguna correlación entre el modelo reducido y un prototipo, a través de un análisis dimensional y leyes de similitud, en un análisis cuantitativo. El objetivo era comparar únicamente el comportamiento estructural de las vigas reforzadas (E2, E3, E4 y E5) y la viga de referencia (E1) en un análisis cualitativo.

2.2 Sistema de Prueba

Las vigas construidas en esta investigación se sometieron a pruebas experimentales realizadas en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Estatal de Vale do Acaraú. Fueron sometidos a la prueba de Stuttgart, en la que se aplicaron dos fuerzas concentradas equidistantes de los soportes. Esto permitió estudiar el refuerzo en las regiones sometidas a flexión pura y donde también se observaron efectos de cortante (flexión simple). La Figura 8 ilustra una prensa hidráulica utilizada para las pruebas.

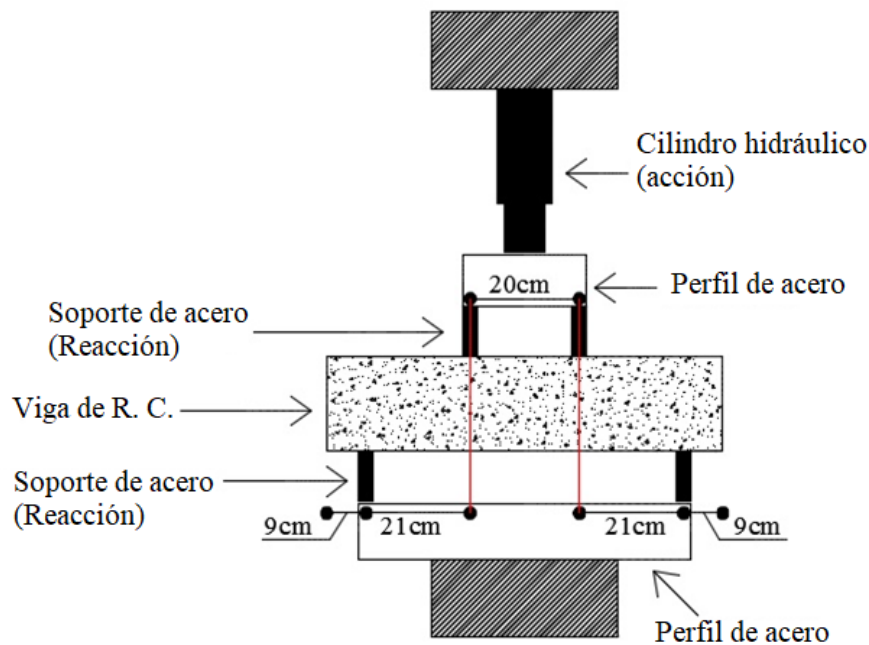


Figura 8. Detalles de la prensa utilizada con una viga en la prueba de Stuttgart.

Las pruebas experimentales se dividen en dos etapas. En la primera etapa, las vigas E2, E3, E4 y E5 están sujetas a una carga de craqueo de 50 kN, que equivale al 60% al 80% de la carga de falla. El objetivo de esta primera etapa era romper las vigas para simular la necesidad de refuerzo. Después de retirar la carga de 50 kN, las vigas se rehabilitaron con barras de acero y adhesivo epoxi. El adhesivo epoxi utilizado para ayudar al anclaje a reforzar las barras del sustrato de la viga fue Sikadur 31, que no se mezcló con arena. La resistencia a la compresión de Sikadur 31 a los tres días de edad fue de 60 MPa, y la rehabilitación siguió las recomendaciones del fabricante (Sika, 2015).

Una semana después de la rehabilitación, comenzó la segunda etapa de las pruebas experimentales, que consistió en cargar las vigas a través de la prueba de Stuttgart. El proceso se realizó con pasos de carga de 10 kN hasta que la viga presentaba fallas. En cada intervalo de la carga aplicada a la viga, se examinó la formación de grietas y se marcó con un marcador de pizarra para ayudar en la identificación de los modos de falla.

2.3 Modelo computacional

Las vigas para las pruebas experimentales también se simularon en el software ANSYS, que utiliza el método de elementos finitos para la discretización de estructuras. El modelado computacional con el software se realizó para replicar las condiciones de la prueba de Stuttgart realizada en el laboratorio. Por lo tanto, las mismas características de los materiales utilizados se consideraron para obtener resultados consistentes, que luego podrían correlacionarse con los resultados del análisis experimental. La Figura 9 ilustra el modelado de los estribos de la viga E1 y una de las otras cuatro vigas, debido a sus barras y espaciado idénticos.

Los soportes y los puntos de aplicación de las cargas se modelaron con un ancho de 20 mm, en lugar de 10 mm como en las pruebas, de modo que no hubo concentraciones de tensión en estas regiones, lo que podría hacer que la convergencia numérica sea compleja y provocar una falla temprana.

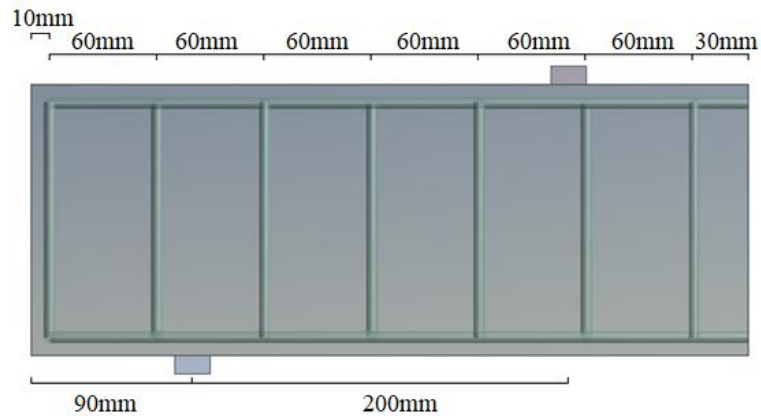


Figura 9. Modelado del refuerzo transversal (estribos) de la viga E1.

Para validar los resultados proporcionados por el software ANSYS con la literatura y estudiar el efecto de la discretización en la precisión de los resultados, las vigas se modelaron teniendo en cuenta las propiedades individuales del acero y los materiales de concreto: el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y las interacciones entre ambos materiales, como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades de los materiales.

Características	Hormigón	Barras de Acero (CA-50)	Adhesivo Epoxi (Sikadur 31)
Módulo de elasticidad	26838 MPa ⁽¹⁾	210 GPa ⁽²⁾	4.3 GPa ⁽³⁾
Coefficiente de Poisson	0.2 ⁽⁴⁾	0.3 ⁽⁵⁾	0.2 ⁽⁵⁾

(¹) Módulo de elasticidad secante del hormigón calculado por NBR6118 (ABNT - NBR6118, 2014);
 (²) Módulo de elasticidad del acero según el fabricante;
 (³) Módulo de elasticidad del adhesivo epoxi según el fabricante;
 (⁴) Coeficiente de Poisson adoptado;
 (⁵) Coeficiente de Poisson según el fabricante.

Se utilizó el elemento tridimensional de ocho nodos Solid65 para modelar el concreto. Este sólido tiene tres grados de libertad en cada nodo, y es capaz de agrietarse y aplastarse bajo tensión y compresión, respectivamente. Este elemento considera el criterio de falla de Willam-Warnke para la compresión, y la región tensada del concreto se considera un material isotrópico con ablandamiento. El elemento se ilustra en la Figura 10.

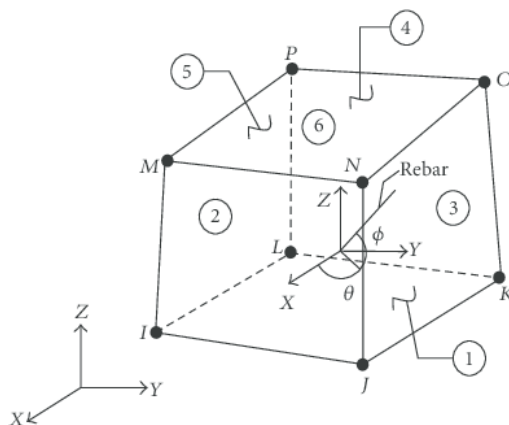


Figura 10. Geometría del elemento Solid65 (Ansys, 2013)

El elemento tridimensional Link180 se utilizó para modelar los refuerzos. Este elemento tiene dos nodos con tres grados de libertad en cada nodo, y se usa ampliamente para representar barras, armaduras y cables de manera simplificada. Este elemento solo resiste las fuerzas axiales y asume que el material exhibe el mismo comportamiento bajo compresión y tensión. Un modelo elastoplástico se define con un gráfico de tensión-tensión bilineal como criterio de falla.

El elemento Shell181 se utilizó para modelar las barras de refuerzo y el adhesivo epoxi. Este tipo de elemento se utiliza principalmente para modelar revestimientos con fibras de carbono, pero también puede usarse para modelar el refuerzo externo con barras de acero. Este elemento tiene cuatro nodos con seis grados de libertad en cada nodo y la capacidad de plasticidad, y su profundidad se considera en el análisis.

El tamaño de la malla fue de 10 mm. Según Muliterno y Pravia (Muliterno y Pravia, 2016), en el análisis no lineal, la carga se divide en una serie de subpasos de modo que en cada subpaso la matriz de rigidez se actualice para considerar las alteraciones no lineales en la rigidez estructural antes de pasar a la siguiente subpaso. Este análisis utilizó 500 subpasos, y en cada paso de carga, la carga se aplicó de abajo hacia arriba y se utilizó un criterio de convergencia basado en la fuerza. La carga se aplicó hasta que se produjo un error de magnitud, que se consideró como el momento del fallo. Los soportes se insertaron en las dos caras superiores de los elementos de reacción y se definieron como desplazamientos cero en los ejes X, Y y Z. El comando CEINTF se ejecutó para combinar los nodos de la viga y el refuerzo, considerando que había una perfecta adherencia entre ambos materiales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Cargas y modos de falla

Después de una verificación visual de las condiciones de las vigas después de la falla, cada viga probada se correlacionó con el modelo computacional y se comparó con la viga de referencia.

Después de que todas las vigas alcanzaron su carga final, se realizó una comparación entre las vigas rehabilitadas y de referencia, analizando las cargas finales y los modos de falla. También se identificó el método de refuerzo más eficiente entre las vigas reforzadas. La Tabla 3 enumera los detalles de los métodos de refuerzo, carga final y modo de falla de cada viga.

Table 3. Descripción de los métodos de reforzamiento, cargas y modos de falla de las vigas.

Viga	Refuerzo	V _{ANSYS} (kN)	V _{Exper} (kN)	V _{Exper} / V _{Ansysis}	Modo de falla
E1	Sin refuerzo	85.00	80.00	0.94	Flexión
E2	2φ6.3 mm Longitud = 50 cm	89.75	108.00	1.20	Flexión
E3	2φ6.3 mm + 7U Longitud = 50 cm	87.75	96.00	1.09	Cizallamiento (puntal comprimido)
E4	2φ6.3 mm Longitud = 30 cm	90.00	116.00	1.29	Flexión
E5	2φ6.3 mm + 3U Longitud = 30 cm	80.00	74.00	0.93	Flexión

V_{Ansysis} = Carga computacional de fallas indicada por el software Ansys;
V_{Exper} = Carga experimental de falla.

3.2 Efecto del modo de solicitación

En las pruebas experimentales, cuando las vigas se sometieron a la segunda etapa, la viga E2 alcanzó una carga máxima de 108 kN, y se verificó que falló después del reforzamiento no unido de la viga, causando fallas por flexión. La comparación con la viga de referencia (E1) verificó que su resistencia aumentó en un 35%.

El análisis de los resultados de la prueba de la viga E3 reveló que falló después del reforzamiento no unido del sustrato de la viga. Sin embargo, a diferencia de viga E2, tenía un modo de falla diferente debido a la compresión del puntal. La comparación con la viga de referencia verificó que la resistencia mecánica de la viga E3 aumentó en un 20%.

El análisis de los resultados de la viga E4 verificó similar a las vigas E2 y E3; falló por flexión después del reforzamiento no unido de la viga. A pesar de las indicaciones de un puntal comprimido causado por los clips, el modo de falla fue la falla por flexión. Exhibió un aumento del 45% en su resistencia con respecto a la viga de referencia.

La viga E5 tenía el mismo modo de falla que las vigas E2 y E4; fue causada por la flexión después del refuerzo no unido de la viga. En comparación con la viga de referencia, su resistencia disminuyó un 7.85%. La figura 11 muestra las vigas probadas después de su falla.

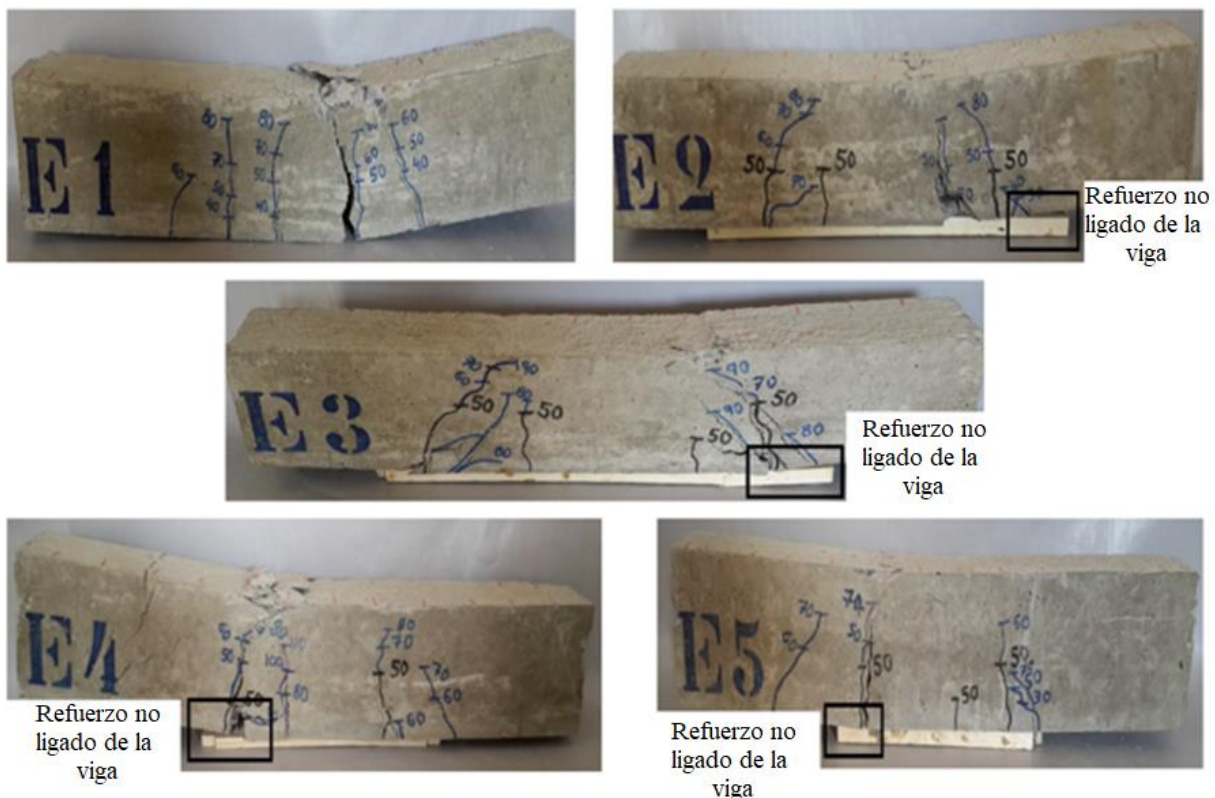


Figura 11. Vigas E1, E2, E3, E4 y E5 después de la falla.

Los resultados obtenidos a través del software ANSYS verificaron que las cargas finales producidas por el software estaban de acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. Los modos de falla de las vigas y la variación en los resultados en comparación con la viga de referencia también fueron similares. Sin embargo, hubo una diferencia en el refuerzo: en la prueba experimental, el refuerzo se desprendió de las vigas antes de que fallaran, pero en el análisis, esto no ocurrió porque no se consideró la fricción entre la viga y el refuerzo. La Figura 12 presenta la gráfica de carga-desplazamiento de las cinco vigas obtenidas del análisis computacional.

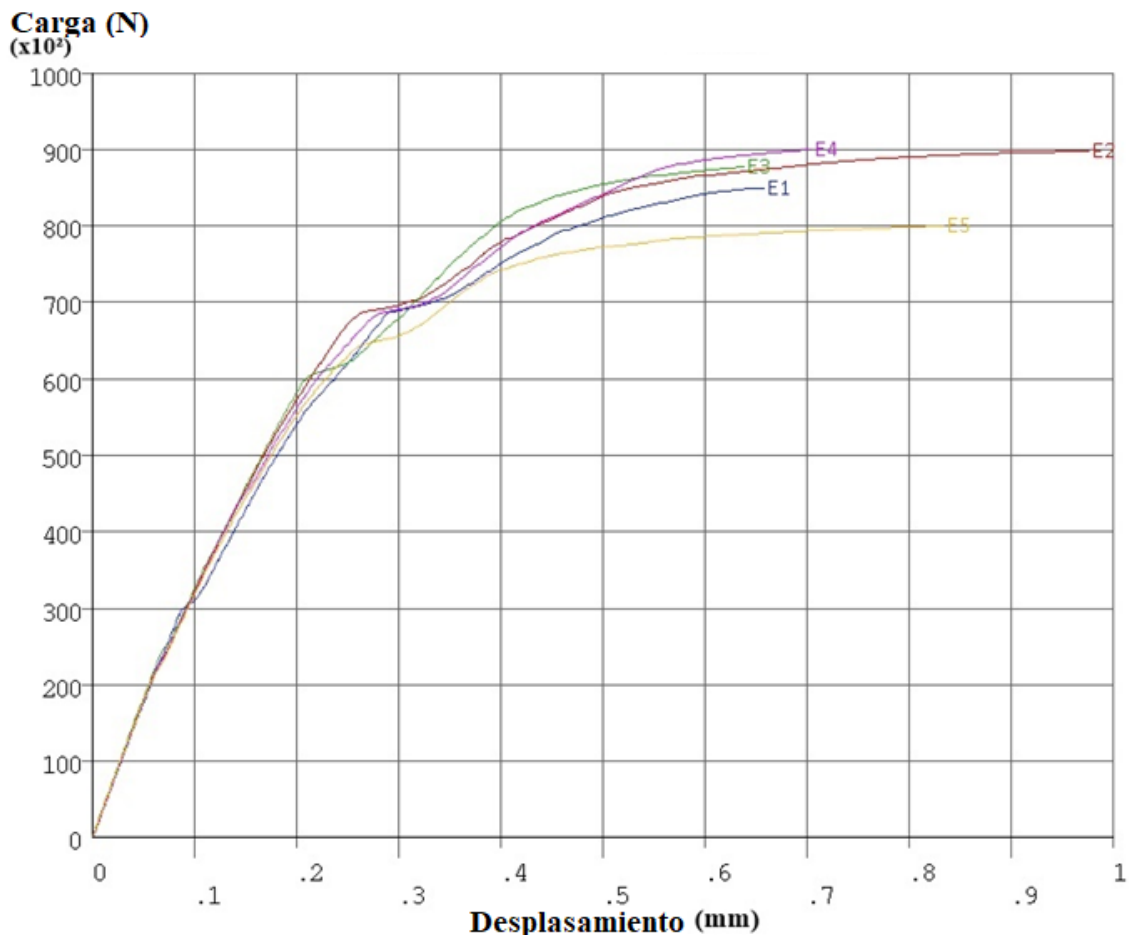


Figura 12. Diagrama de carga-desplazamiento de todas las vigas en la misma escala.

Dahmani, Khennane y Kaci (Dahmani, Khennane y Kaci, 2010) enfatizaron la simbología de ANSYS para los tipos de falla debida a la flexión (por grieta de flexión), corte (por grieta de corte) y compresión (por aplastamiento). Estas simbologías se presentan como las etiquetas en la Figura 13. Además, Dahmani, Khennane y Kaci (2010) afirmaron que estos símbolos también podrían combinarse según el tipo de falla. Es importante enfatizar que este tipo de falla mostrada por ANSYS es una falla local, por ejemplo, la apertura de una grieta y una trituración localizada. Solo no proporciona el fallo de toda la viga. Una combinación de estas fallas localizadas es lo que caracteriza la falla de la viga como un todo.

El objetivo del análisis numérico de las vigas reforzadas fue mostrar la distribución de la tensión en las vigas después de la inserción de la intensificación, para proporcionar resultados para la comparación con los resultados experimentales.

El análisis de la imagen, según lo generado por ANSYS (Figura 13), muestra el rayo craqueado en el instante anterior a la falla, así como la ubicación de los clips y el refuerzo. Esto verifica que en la región donde se refuerza la viga, la apariencia de las tensiones de compresión es muy perceptible, principalmente cuando el primer clip se inserta en la viga (de izquierda a derecha). A partir de la correlación con la prueba experimental, se puede observar que esta es la misma región donde se aplasta el concreto (Figura 11), es decir, la región donde la viga sufre una falla.

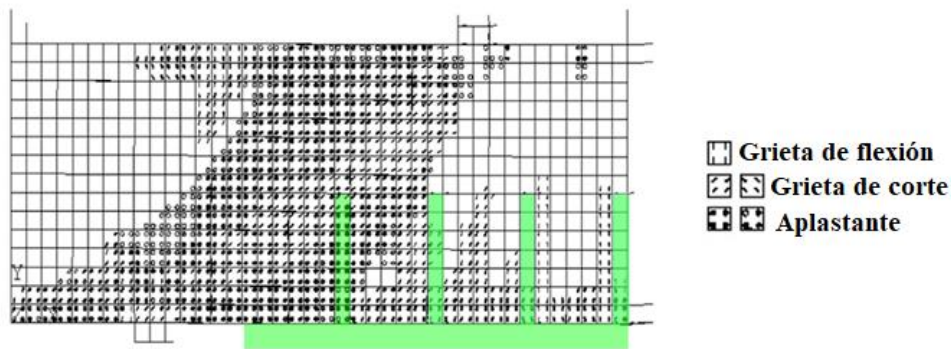


Figura 13. Patrón de grietas y aplastamiento generado por ANSYS para la viga E3.

El uso de clips en el reforzamiento de las vigas, cuyo objetivo era mejorar el anclaje, generó concentraciones de esfuerzos indeseables en las vigas. En el análisis de este problema utilizando el modelo de puntal y amarre, se observó un puntal secundario desde la parte superior de la presilla hasta la parte inferior del estribo, que sobrecargó el puntal existente (Figura 14).

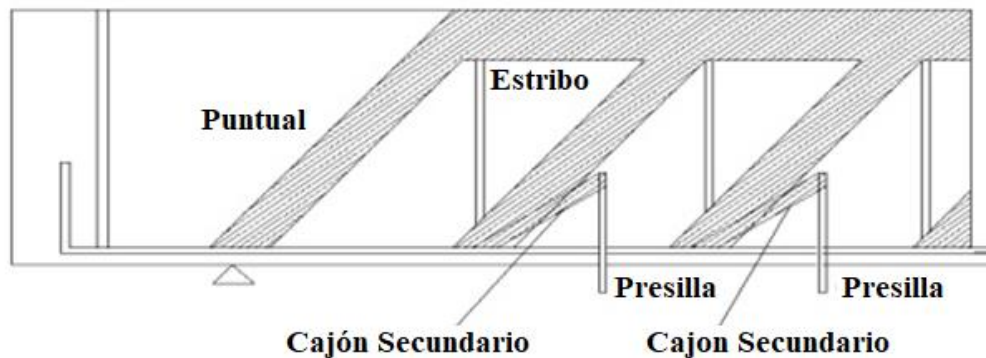


Figura 14. Modelo de puntal y amarre para vigas E3 y E5.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, el análisis de los resultados verificó que las vigas con clips ayudaron en el anclaje entre la viga y el refuerzo (E3 y E5). Más precisamente, para viga E3, el modo de falla fue un puntal comprimido, que podría ser razonado por el aumento en el campo de compresión de la viga causado por la adición de los clips. Para la viga E5, que falló bajo una carga menor que la viga de referencia (E1), se verificó que después de perforar la viga para insertar los clips, se redujo su rigidez, lo que dañó la resistencia de la viga.

La viga E4 experimentó la mayor carga de falla, y solo fue distinguible de la viga E2, para la cual se usó la misma técnica de refuerzo, a través de su longitud. Se puede concluir que el refuerzo de la viga E2 fue efectivo en la región de flexión simple hasta que se desprendió de la viga y sufrió una falla. El refuerzo de la viga E4 fue efectivo en la región de flexión pura, lo que explica su mayor carga final en comparación con la viga E2 y todas las demás vigas probadas.

El objetivo del análisis computacional de las vigas reforzadas fue mostrar la distribución de la tensión en las vigas después de la inserción del refuerzo para compararlos con los resultados reales y validarlos. Por lo tanto, se puede concluir que, en general, el análisis realizado simuló satisfactoriamente las pruebas experimentales, explicando el fallo debido a la compresión diagonal de la viga E3.

El análisis de las vigas reforzadas y de referencia reveló que las vigas E2 y E4 estaban bajo cargas finales superiores en comparación con las otras vigas. Sin embargo, se puede concluir que, en este

estudio, la adición de los clips a las vigas E3 y E5 dañó su resistencia. Además, la falta de unión del refuerzo, que se produjo en todas las vigas reforzadas, se debió a que la resina epoxi tiene un módulo de elasticidad significativamente más bajo que el de los otros materiales del sistema. Por lo tanto, cuando se cargó una viga reforzada, debido a una rigidez insuficiente, la resina no transfirió toda la tensión que recibió de la cara inferior de la viga. Esto dio lugar a la desvinculación del refuerzo, lo que indica que solo el acero funciona. El escenario sería diferente si los materiales tuvieran módulos de elasticidad similares. Por lo tanto, a pesar de que las vigas E2, E3 y E4 tienen mayores cargas finales que las vigas de referencia, el sistema no funciona de manera eficiente. Por lo tanto, no se recomienda utilizar este tipo de refuerzo porque es ineficaz y puede ser peligroso. Es importante enfatizar que las conclusiones de este trabajo se limitan solo a los resultados de las pruebas de las cinco vigas presentadas aquí. Otros estudios de investigación futuros con más pruebas de vigas y con y sin refuerzo son necesarios para una mejor validación de esta investigación.

5. REFERENCIAS

- Alfaiate, J., Costa, R. (2004). “*O reforço de vigas de betão armado com chapas metálicas coladas com resina*”. Métodos Computacionais em Engenharia, APMTAC, Portugal, pp 1-13. <http://hdl.handle.net/10400.1/1397>
- Altun, F. (2004) “*An experimental study of jacketed reinforced concrete beams under bending*”. Construction and Building Materials, 18 (8), pp. 611-618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.005>
- Ansys (2013). “*Ansys Mechanical APDL Technology Structural Analysis Guide*”. ANSYS Inc. Release 15.0, Southpointe, 498p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2014), *NBR 6118: Projetos de Estruturas de Concreto - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2007), *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1994), *NBR 7222: Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Cheong, H. K., MacAlevey, N. (2000), “*Experimental behavior of jacketed reinforced concrete beams*”. Journal of Structural Engineering - ASCE, 126(6), pp. 692-699. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2000\)126:6\(692\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:6(692))
- Dahmani, L., Khennane, A., Kaci, S. (2010), “*Crack identification in reinforced concrete beams using ANSYS software*”. Strength of Materials Journal, 42 (2). pp. 232-240.
- Deghenhard, C. C., Teixeira, T., Vargas, A., Vito, M., Piccinini, A. C., Do Vale Silva, B. (2016), “*Análise experimental de distintas configurações de chapa metálica no reforço à flexão em vigas de concreto armado*”. Revista Alconpat, v. 6, n° 2, pp 190-201. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v6i2.138>
- Helene, P. R. L. (2000). “*Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto*”. 2ª ed, São Paulo: Editora Pini, 213 p.
- Lima, E. M. F. (2015) “*Estudo teórico-experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com barras de aço em dentes de adesivo epóxi*”. Sobral. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA).
- Muliterno, B. K., Pravia, Z. M. C. (2016) “*Modelo para vigas de concreto armado*”. Técnica: Revista de Tecnologia da Construção (São Paulo), v. 231, pp. 22-25.

- Reis, A. P. A. (1998). “*Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho*”. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- Reis, A. P. A. (2003). “*Reforço de vigas de concreto armado submetidas a pré-carregamento e ações de longa duração com aplicação de concretos de alta resistência e concretos com fibras de aço*”. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- Santos, E. W. F. (2006). “*Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial*”. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) - Coppe - UFRJ.
- Sika (2015). “*Manual Técnico – Produtos Sika*”. Osasco: Sika, 671 p.