



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**EFFECTIVIDAD DE LAS TÉCNICAS DE REVESTIMIENTO
MÁS COMUNES PARA EL REFORZAMIENTO DE
COLUMNAS DE CONCRETO REFORZADO**

Estefania Ospina Gómez

Jonathan López Román

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2019



Efectividad de las técnicas de revestimiento más comunes para el reforzamiento de
columnas de concreto reforzado

Estefanía Ospina Gómez

Jonathan López Román

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de: **Especialización en
Análisis y Diseño de Estructuras**

Asesor(a):

Daniela Quinchia Espinosa

Ingeniera Civil - Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2019

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	3
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2.	OBJETIVOS	4
1.2.1.	Objetivo general	4
1.2.2.	Objetivos específicos	4
2.	MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE	5
2.1.	ASPECTOS QUE CONLLEVAN A REFORZAR UNA ESTRUCTURA	5
2.2.	MÉTODOS DE REFORZAMIENTO PARA COLUMNAS DE CONCRETO REFORZADO	6
2.2.1.	Encamisado en concreto reforzado	7
2.2.1.1.	Definición del método de reforzamiento	7
2.2.1.2.	Investigación de pruebas experimentales	8
2.2.1.3.	Análisis de los resultados del comportamiento estructural	13
2.2.1.4.	Análisis de los costos y tiempos de ejecución	20
2.2.1.4.1.	Procedimiento constructivo.	20
2.2.1.4.2.	Equipos	21
2.2.1.4.3.	Materiales	22
2.2.1.4.4.	Costo de ejecución	22
2.2.1.4.5.	Tiempo de ejecución por sub actividades.	24
2.2.2.	Encamisado en acero o platinas metálicas	24
2.2.2.1.	Definición del método de reforzamiento.	24

2.2.2.2.	Investigación de pruebas experimentales.	25
2.2.2.3.	Análisis de los resultados del comportamiento estructural.	31
2.2.2.4.	Análisis de los costos y tiempos de ejecución	32
2.2.2.4.1.	Procedimiento constructivo.	32
2.2.2.4.2.	Equipos	33
2.2.2.4.3.	Materiales	33
2.2.2.4.4.	Costo de ejecución.	33
2.2.2.4.5.	Tiempo de ejecución por sub actividades.	35
2.2.3.	Revestimiento con polímeros reforzados de fibra de carbono	35
2.2.3.1.	Definición del método de reforzamiento.	35
2.2.3.2.	Investigación de pruebas experimentales.	36
2.2.3.3.	Análisis de los resultados del comportamiento estructural.	40
2.2.3.4.	Análisis de los costos y tiempos de ejecución	41
2.2.3.4.1.	Procedimiento constructivo.	41
2.2.3.4.2.	Equipos	42
2.2.3.4.3.	Materiales	42
2.2.3.4.4.	Costo de ejecución.	43
2.2.3.4.5.	Tiempo de ejecución por sub actividades.	44
3.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
4.	BIBLIOGRAFÍA	49

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Reforzamiento de columnas con encamisado en concreto.	7
Ilustración 2. Encamisado en concreto reforzado.	8
Ilustración 3. Dimensiones de la columna original sobre base sólida.	9
Ilustración 4. Estribos terminan soldados para el espécimen N.....	10
Ilustración 5. Conectores de acero entre refuerzo longitudinal de la columna existente y del encamisado del espécimen W.	11
Ilustración 6. Configuración de prueba y ensayo de especímenes con encamisado en concreto.	13
Ilustración 7. Carga contra curva de desplazamiento para muestra N.....	14
Ilustración 8. Patrones de grietas para la muestra N después de la prueba.....	14
Ilustración 9. Carga contra curva de desplazamiento para muestra E.	15
Ilustración 10. Patrones de grietas para la muestra E después de la prueba.	16
Ilustración 11. Carga contra curva de desplazamiento para muestra W.	17
Ilustración 12. Patrones de grietas para la muestra W después de la prueba.....	17
Ilustración 13. Curva de carga contra desplazamiento para la muestra no reforzada.	18
Ilustración 14. Curva de carga contra desplazamiento para la muestra monolítica.....	19
Ilustración 15. Proceso constructivo de encamisado en concreto.....	21
Ilustración 16. Tipos de encamisado en acero.	25
Ilustración 17. Dimensiones de especímenes y sus configuraciones de encamisado de acero.	26
Ilustración 18. Curvas fuerza - desplazamiento de especímenes con encamisado de acero.	27

Ilustración 19. Configuración de especímenes con revestimiento de acero	29
Ilustración 20. Cargas laterales y deformaciones de especímenes con encamisado de acero.	30
Ilustración 21. Detalle de montaje de encamisado en acero.	33
Ilustración 22. Costo de Pernos de anclaje HILTI HSL-3 M10 / 20	35
Ilustración 23. Encamisado FRP.....	36
Ilustración 24. Configuración de especímenes con revestimiento de CFRP	38
Ilustración 25. Cargas laterales y deformaciones de especímenes con revestimiento de CFRP.	39
Ilustración 26. Proceso constructivo de recubrimiento en CFRP	42

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resistencia del concreto de la columna original y el encamisado.....	12
Tabla 2. Resumen de las características de los especímenes reforzados	12
Tabla 3. Resumen de los resultados de la prueba	19
Tabla 4. Presupuesto de encamisado en concreto.....	22
Tabla 5. Tiempo de ejecución de encamisado de concreto.....	24
Tabla 6. Cargas de falla y desplazamientos de especímenes con encamisado de acero.....	27
Tabla 7. Tipo y zona de encamisado implementado en cada uno de los especímenes con encamisado de acero ensayados por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017).....	31
Tabla 8. Porcentaje de incremento de resistencia a carga lateral y de la capacidad a la deformación de los especímenes con encamisado de acero ensayados por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017).....	31
Tabla 9. Presupuesto de encamisado en acero	34
Tabla 10. Tiempo de ejecución de encamisado de acero.....	35
Tabla 11. Datos experimentales representativos sobre columnas reforzadas con CFRP bajo carga axial.....	36
Tabla 12. Tipo y zona de encamisado implementado en cada uno de los especímenes con revestimiento de CFRP ensayados por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017)....	39
Tabla 13. Porcentaje de incremento de resistencia a carga lateral y de la capacidad a la deformación de los especímenes con revestimiento de CFRP ensayados por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017).....	40
Tabla 14. Presupuesto de recubrimiento en CFRP	43
Tabla 15. Tiempo de ejecución de revestimiento en CFRP.....	44
Tabla 16. Matriz de comparación de diferentes técnicas de reforzamiento.....	45

Tabla 17. Ventajas y desventajas de las diferentes técnicas de reforzamiento.46

RESUMEN

En la actualidad existen muchas técnicas de revestimiento que permiten el reforzamiento de elementos estructurales, utilizadas para obtener la estabilidad y capacidad requerida por una edificación. La necesidad de reforzar una estructura, surge a consecuencia de varios factores como lo son: el envejecimiento de la estructura, deterioro del concreto, cambios de uso de la estructura, errores en la etapa de diseño o construcción, corrosión del acero de refuerzo, eventos sísmicos de mayor magnitud a los estimados, entre otros. En la presente monografía se tratan tres de los métodos de reforzamiento de columnas de concreto reforzado más utilizados: encamisado en concreto reforzado, encamisado en acero o platinas metálicas y revestimiento con polímeros reforzados de fibra de carbono.

Se hace una revisión de investigaciones experimentales realizadas por varios autores, los cuales analizan el comportamiento estructural de especímenes de columnas de concreto reforzado luego de ser intervenidas mediante alguna de las tres técnicas de reforzamiento anteriormente mencionadas.

Finalmente, se realiza un análisis comparativo entre las variables de resistencia, durabilidad, rigidez, costos, tiempos de ejecución y estética obtenidas para las tres técnicas de reforzamiento investigadas y concluir sobre su efectividad.

Palabras claves:

Reforzamiento, revestimiento, encamisado, concreto, acero, CFRP.

ABSTRACT

There are many jacketing techniques that allow the reinforcement of structural elements, used to obtain the stability and capacity required by a building. The need to reinforce a structure, arises as a result of several factors such as the aging of the structure, deterioration of the concrete, changes in the use of the structure, errors in stage of design or construction, corrosion of the reinforcing steel, seismic events of greater magnitude to the estimated ones, among others. This monograph deals with three of the most commonly used reinforced concrete column reinforcement methods: reinforced concrete jacketing, steel or metal plate jacketing and carbon fiber reinforced polymer coating.

A review of experimental investigations carried out by several authors is made, which analyze the structural behavior of specimens of reinforced concrete columns after being intervened by any of the three reinforcement techniques mentioned above.

Finally, a comparative analysis is carried out between the variables of resistance, durability, stiffness, costs, execution times and esthetics obtained for the three reinforcement techniques investigated and conclude about its effectiveness.

Keywords:

Reinforcement, coating, jacketing, concrete, steel, CFRP

1. INTRODUCCIÓN

Esta monografía comprende la recopilación y análisis de la información relevante surgida de la revisión del estado del arte sobre las técnicas de revestimiento para el reforzamiento de columnas de concreto reforzado. Además, analizar el comportamiento estructural de estos elementos luego de incrementar su capacidad y rigidez mediante el uso de técnicas de reforzamiento, lo anterior, debido a una deficiencia en su capacidad originada por cambio de uso de la estructura, sismos, incendios, mala calidad de la construcción, entre otros aspectos que conllevan a repotenciar una estructura existente.

Se estudian tres (3) de los métodos de reforzamiento más comunes en la actualidad para determinar su eficacia y eficiencia con base en unos criterios técnicos, económicos y constructivos.

Luego de la revisión de literatura, en la cual se investigan experimentalmente especímenes reforzados con las técnicas más comunes, se analiza el comportamiento y el tipo de falla de estos elementos que según la literatura han sido puestos a prueba para ver su respuesta.

Finalmente, a partir del análisis comparativo entre las técnicas de revestimiento investigadas se determina cuál es la más efectiva para el reforzamiento de columnas de concreto reforzado.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad se han presentado algunos problemas con la estabilidad y funcionalidad de edificios, principalmente ocasionados por errores en la etapa de diseño o construcción, para lo cual el reforzamiento de una estructura puede ser económicamente viable en

comparación con la demolición de un edificio, que puede traer no solo un gran impacto económico sino social.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Revisión de la literatura sobre la efectividad del reforzamiento de columnas de concreto reforzado mediante tres técnicas de revestimiento.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar los tres métodos de reforzamiento para columnas de concreto reforzado más usados e implementados en la actualidad.
- Realizar un comparativo de las tres técnicas de revestimiento más comunes en la actualidad para determinar su eficacia y eficiencia para el reforzamiento de columnas de concreto reforzado.
- Analizar cuál de las técnicas de revestimiento es la más efectiva para el reforzamiento de columnas de concreto reforzado.

2. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

Como afirma Truong, G. T, Kim, J. C, & Choi, K. K. (2017), en la actualidad existen muchos métodos de reforzamiento que permiten rehabilitar elementos estructurales, sin embargo, entre los más utilizados para el reforzamiento de columnas en concreto reforzados están:

- Encamisado de concreto reforzado.
- Encamisado en acero o platinas metálicas.
- Reforzamiento con FRP (Fiber Reinforced Polymers).

De acuerdo con Raza, S., Khan, M. K., Menegon, S. J., Tsang, H. H., & Wilson, J. L. (2019), se pretende analizar la rigidez, resistencia y capacidad de desplazamiento en diferentes especímenes mediante el uso de técnicas de reforzamiento.

La rehabilitación y/o fortalecimiento es una solución más sostenible en comparación con simplemente demoler y reconstruir toda la instalación, tanto desde el punto de vista de la conservación de los recursos como por ejemplo en: tiempo, costo y materiales (Raza, S., Khan, M. K., Menegon, S. J., Tsang, H. H., & Wilson, J. L., 2019).

2.1. ASPECTOS QUE CONLLEVAN A REFORZAR UNA ESTRUCTURA

Según Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017), los diferentes sismos que se han presentado en los últimos años, han afectado edificios antiguos e incluso nuevos, los cuales no satisfacen los requisitos especiales de los códigos de diseño sísmico actuales, ya que han demostrado unos daños significativos o un colapso completo. El colapso de tales edificios de concreto reforzado fue causado principalmente por falla en las columnas, que se atribuyeron a detalles del acero de refuerzo inadecuados.

Al igual que los autores anteriores, Wu, Y. F., Liu, T., & Oehlers, D. J (2006), menciona que muchas estructuras de concreto reforzado existentes fueron diseñadas y construidas antes de la aplicación de los códigos modernos de diseño sismo resistente, siendo vulnerables a los sismos por encima de la escala moderada.

Debido al cambio de uso que puede presentar una estructura, los factores sísmicos varían aumentando el espectro de diseño, y es por esto que desde que se introdujo el primer método de revestimiento de acero, como técnica para cambios y adaptación sísmica de una estructura, los confinamientos de acero y polímeros reforzados con fibra (FRP), han sido reconocidos como un medio muy eficaz para mejorar el rendimiento ante eventos sísmicos (Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A, 2015).

Se han presentado importantes avances en el área de refuerzo, de columnas reforzadas con polímeros reforzados con fibra (FRP) para varios escenarios de carga, incluida la carga de impacto. La adición de material de FRP ayudan a mejorar las deficiencias o fortalecer los componentes estructurales los cuales puede salvar vidas al evitar colapsos, reducir el daño a la infraestructura y la necesidad de sus costosos reemplazos (Parvin, A., & Brighton, D, 2014).

La necesidad de fortalecer y reparar surge a causa de una serie de otros factores tales como el envejecimiento de la estructura, deterioro del concreto, cambio en el uso del edificio y requisitos de carga, errores de diseño, corrosión del refuerzo y errores de construcción durante la construcción. (Raza, S., Khan, M. K., Menegon, S. J., Tsang, H. H., & Wilson, J. L; 2019)

2.2. MÉTODOS DE REFORZAMIENTO PARA COLUMNAS DE CONCRETO REFORZADO

De acuerdo con Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017), Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008), Parvin, A.; Wang, W. (2001), Wu, Y. F., Liu, T., & Oehlers, D. J. (2006), los métodos de reforzamiento para columnas de concreto reforzado más usados e

implementado en la actualidad, consisten en chaquetas que se han construido en concreto, elementos de acero y materiales compuestos por polímeros reforzados con fibras.

2.2.1. Encamisado en concreto reforzado



Ilustración 1. Reforzamiento de columnas con encamisado en concreto.

Tomada de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.

2.2.1.1. Definición del método de reforzamiento

El encamisado de concreto reforzado consiste en aumentar la dimensión de la columna afectada, por medio de un concreto reforzado de mayor o igual resistencia al de la columna existente, además, las barras de acero corrugado longitudinales y transversales deben ser soldadas entre sí y unidas por medio de conectores de acero que permiten la interacción entre la columna antigua y nueva (Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E, 2008).

De acuerdo a los autores Raza, S., Khan, M. K., Menegon, S. J., Tsang, H. H., & Wilson, J. L (2019), en los encamisados tradicionales de concreto reforzado, la sección de la columna se amplía proyectando una nueva sección de concreto reforzado, sobre una parte o toda la longitud de la columna. La nueva sección está unida a la sección original a través de barras de anclaje o pernos de alta resistencia.

Desde la parte constructiva, Vadoros, K. G., & Dritsos (2008) indica que el encamisado de concreto reforzado se evaluará en 3 especímenes denotados con la letra N, E y W, debido a la incertidumbre constructiva que genera este método. El detalle de los especímenes mencionados se describe en el ítem de investigación de pruebas experimentales.

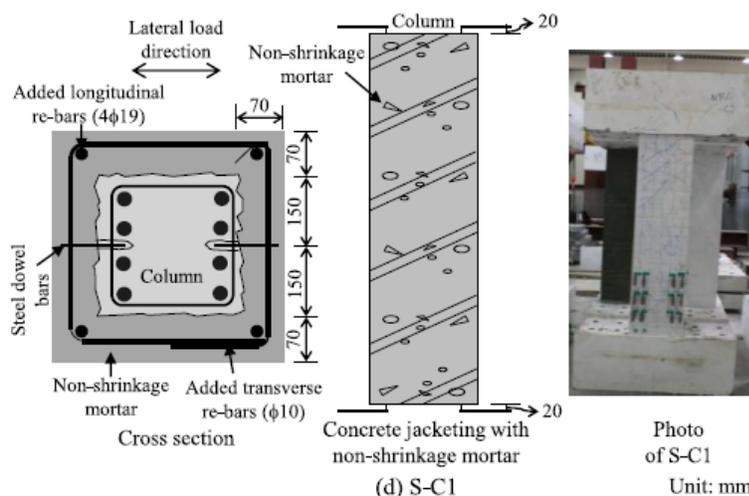


Ilustración 2. Encamisado en concreto reforzado.

Tomado de Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017). *Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods. Engineering Structures*

2.2.1.2. Investigación de pruebas experimentales

Vadoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008), estudia la efectividad del fortalecimiento de columnas de concreto reforzado por medio de encamisado de concreto. En esta se analizan varios especímenes, identificando claramente como es el comportamiento de la muestra sin reforzar y la otra mediante el encamisado de concreto, que se puede presentar de diversas maneras en la parte constructiva. La primera de ellas consiste en soldar los extremos de los estribos de la chaqueta del reforzamiento (para la evaluación de los resultados de los especímenes el autor denota este espécimen con la letra N), la segunda al igual que la primera se soldarán los estribos de los extremos y se colocarán unos conectores o espigas como soporte para el refuerzo longitudinal del encamisado denotado con la letra E, y por último, la

tercera consiste en colocar espigas o conectores de acero, soldados a las barras longitudinales de la columna existente y la chaqueta de reforzamiento (denotado con la letra W), para cada muestra se construyó una columna sobre una base sólida, como se muestra en la Ilustración 3.

Además, los especímenes de columnas construidas presentan deficiencias constructivas como en el acero longitudinal liso, estribos ampliamente espaciados y ganchos inadecuados en la zona confinada. Las bases sobre las cuales estarán cada una de las columnas o especímenes a fallar, fueron reforzadas lo suficientemente bien para contar con una cimentación o base muy buena, para que posiblemente no se presente algún tipo de falla por este medio. La columna original era idéntica a la de un espécimen no fortalecido que será denotado con la letra O.

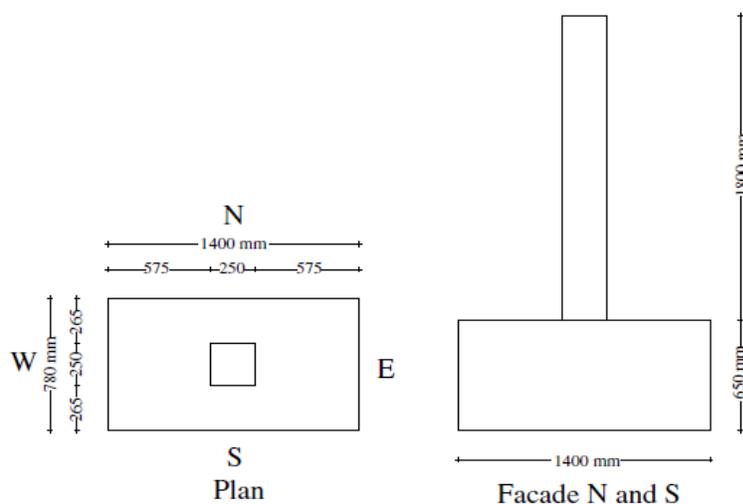


Ilustración 3. Dimensiones de la columna original sobre base sólida.

Tomado de Vadoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

Especímen denotado con la letra N: Para el espécimen N, los extremos de los cuatro estribos más debajo del encamisado fueron soldados entre sí. La longitud de la soldadura fue de 50 mm, como se muestra en la Ilustración 4 a continuación.

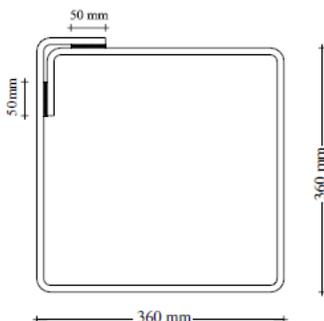


Ilustración 4. Estribos terminan soldados para el espécimen N.

Tomado de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

Espécimen denotado con la letra E: Se perforaron agujeros de 22 mm de diámetros en cada lado de la columna original, medidos desde la base a una altura de 200 mm, 700 mm y 1200 mm. Se inyectó una resina especial en los orificios antes de colocar los conectores o espigas, en forma de L de 20 mm de diámetro y dimensiones 150 mm por 100 mm (acero grado S500). La parte larga del conector o espiga se colocó 100 mm en los agujeros y, después de la colocación sobresalía 50 mm de la columna original. Las barras longitudinales se colocaron después de colocar los estribos del encamisado. Además, los extremos de los cuatro estribos más bajo del encamisado se soldaron juntos, como se realizó para el espécimen N.

Espécimen denotado con la letra W: Se soldaron los conectores de acero doblados entre las barras de refuerzo longitudinales de la columna original y la chaqueta de reforzamiento. Los conectores de acero son barras de refuerzo de 16 mm de diámetro (acero grado S500) como se muestra en la siguiente ilustración.

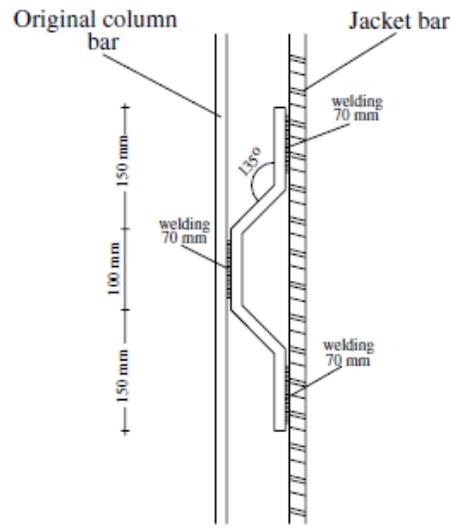


Ilustración 5. Conectores de acero entre refuerzo longitudinal de la columna existente y del encamisado del espécimen W.

Tomado de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

Los conectores de acero se colocaron en cada una de las esquinas de la muestra a alturas de 250 mm, 700 mm y 1100 mm por encima de la base. En total, se colocaron 12 conectores de acero. El proceso de colocación de los conectores de acero se describe a continuación, en las esquinas de concreto de recubrimiento, de la columna original fue demolido hasta encontrar el acero, los conectores de acero fueron soldados entre refuerzo longitudinal de la columna original en un solo punto y en el refuerzo longitudinal del encamisado en dos puntos.

Tabla 1. Resistencia del concreto de la columna original y el encamisado.

Table 2
Concrete strengths

Specimen	N	E	W	O
Original column concrete strength (MPa)	27.0	36.8	22.9	27.0
Jacket concrete strength (MPa)	17.8	24.0	18.8	–

Tomada de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

Tabla 2. Resumen de las características de los especímenes reforzados

Table 3
Strengthened specimens characteristics

Specimen	N	E	W
Jacket concrete	Poured	Poured	Shotcrete
Dowels	No	Yes	No
Bent down bars	No	No	Yes
Stirrup ends welding	Yes	Yes	No

Tomada de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

Se utilizó el mismo procedimiento de prueba para todas las muestras. Cada muestra se movió primero al área de prueba y se ancló a un piso fuerte. Se utilizó un gato hidráulico y una viga de acero IPE 600 para aplicar una carga axial constante a la parte superior de cada muestra como se muestra en la Ilustración 6. Cada prueba se inició mediante la aplicación de una carga cíclica horizontal controlada por desplazamiento en la parte superior de la parte no encapsulada de la columna. El desplazamiento lateral de la columna también se midió en este punto.



Ilustración 6. Configuración de prueba y ensayo de especímenes con encamisado en concreto.

Tomada de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.

2.2.1.3. Análisis de los resultados del comportamiento estructural

Especimen N

La prueba finaliza cuando el desplazamiento fue de 80 mm debido a la degradación de la resistencia y al daño extenso del encamisado. La fuerza máxima del espécimen fue 149.8 kN. Cuando finalizó la prueba, la fuerza se había reducido al 58% del máximo. Después de la prueba, el estado del encamisado era muy malo. Se habían producido grietas en los cuatro lados del espécimen y en toda la altura del encamisado. La separación del encamisado de la columna original era obvia. Las barras de refuerzo del encamisado no se doblaron porque los extremos del estribo estaban soldados entre sí. Después de alcanzar la resistencia máxima, hubo una caída repentina en la resistencia, que se debió a la separación del encamisado de la

columna original. La pérdida de unión entre el encamisado y la columna original resultó en que todo el daño se restringiera al encamisado, mientras que la columna original permaneció intacta.

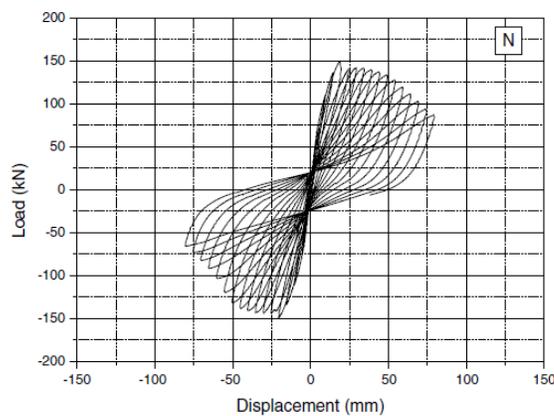


Ilustración 7. Carga contra curva de desplazamiento para muestra N.

Tomada de Vандoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.

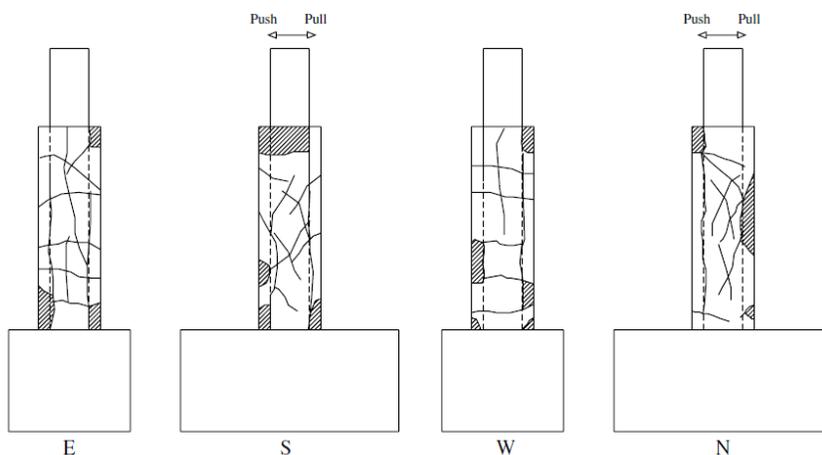


Ilustración 8. Patrones de grietas para la muestra N después de la prueba.

Tomada de Vандoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.

Espécimen E

La prueba se terminó cuando el desplazamiento fue de 100 mm. La resistencia máxima de la muestra fue de 162.7 kN y, cuando finalizó la prueba, la resistencia fue del 66% del máximo. El daño del encamisado fue bastante extenso en los cuatro lados, pero el daño no se extendió a la columna original debido a la pérdida de unión entre el encamisado y la columna original. No se observó pandeo en la barra y esto puede atribuirse principalmente al hecho de que los estribos soldados no se abrieron.

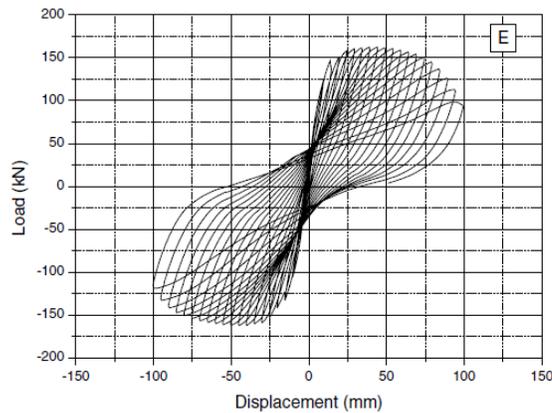


Ilustración 9. Carga contra curva de desplazamiento para muestra E.

Tomada de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.

En la siguiente ilustración se presenta el patrón de fisuras en las cuatro caras del reforzamiento de la columna, siendo E: Cara Este, S: Cara Sur; W: Cara Oeste, N: Cara Norte.

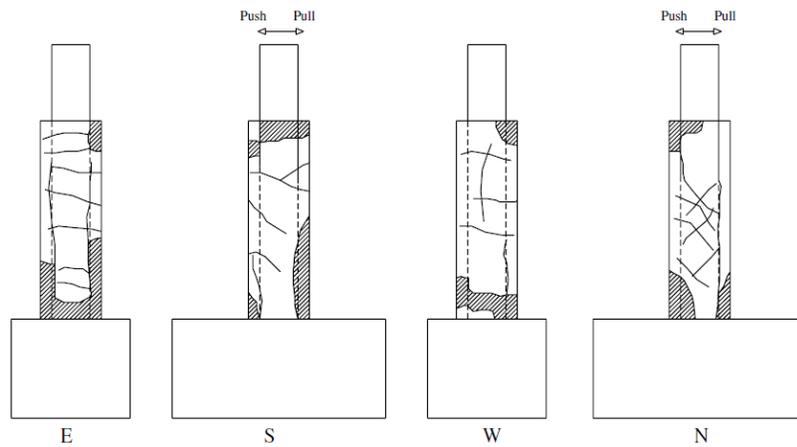


Ilustración 10. Patrones de grietas para la muestra E después de la prueba.

Tomada de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

Espécimen W

La prueba se terminó cuando el desplazamiento fue de 105 mm. La fuerza máxima de la muestra fue 145.1 kN y la fuerza restante al final de la prueba fue 69% de la máxima. El vínculo entre el encamisado y la columna original era muy bueno y era significativamente mejor que las dos muestras N y E. Esto puede atribuirse al uso del concreto premezclado en lugar de concreto hecho en obra.

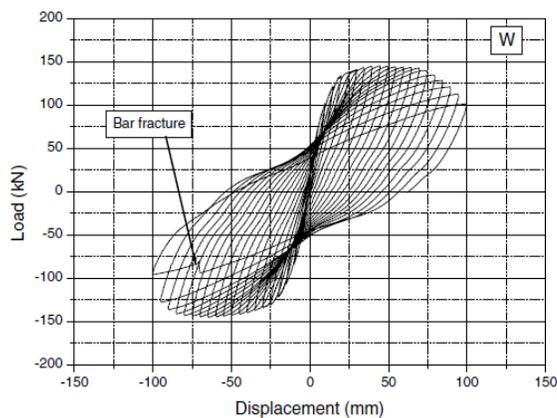


Ilustración 11. Carga contra curva de desplazamiento para muestra W.

Tomada de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

En la siguiente ilustración se presenta el patrón de fisuras en las cuatro caras del reforzamiento de la columna, siendo E: Cara Este, S: Cara Sur; W: Cara Oeste, N: Cara Norte.

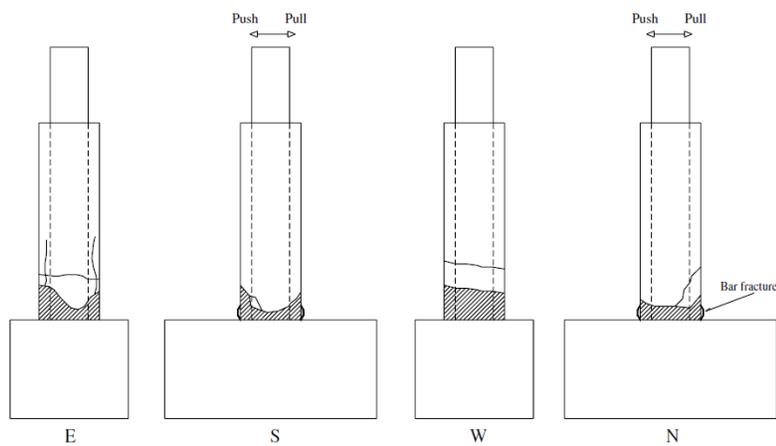


Ilustración 12. Patrones de grietas para la muestra W después de la prueba.

Tomada de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

Espécimen O

Para la muestra no fortalecida, la resistencia máxima fue de 43.5 kN y, al final de la prueba, la resistencia de la muestra se había degradado al 50% del máximo.

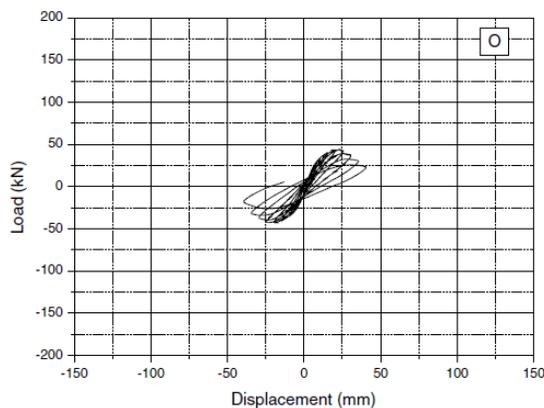


Ilustración 13. Curva de carga contra desplazamiento para la muestra no reforzada.

Tomada de Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.

Espécimen M

La muestra falló debido a la flexión. La prueba se terminó cuando el desplazamiento era de 100 mm, porque la fuerza de la muestra había reducido significativamente. La resistencia máxima de la muestra fue de 179.0 kN y, al final de la prueba, la resistencia de la muestra se había degradado al 56% del máximo. Las barras de refuerzo externas no se fracturaron y no se observó daños en los estribos.

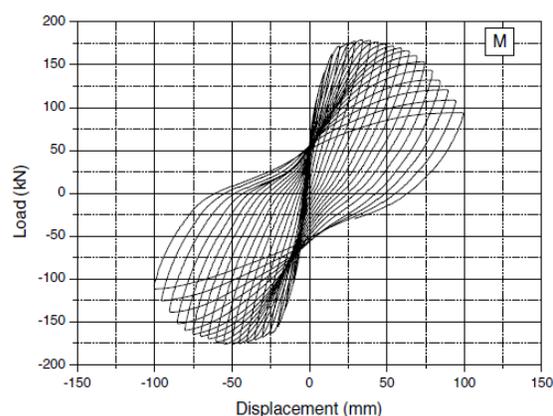


Ilustración 14. Curva de carga contra desplazamiento para la muestra monolítica.

Tomada de Vadoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

Tabla 3. Resumen de los resultados de la prueba

O	32.5	8.9	43.5	19.7	34.8	32.6
Test results						
Specimen	P_y (kN)	δ_y (mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)
N	95.2	6.1	149.8	18.2	119.8	59.5
E	142.0	7.7	162.7	44.2	130.1	87.4
W	120.4	8.5	145.1	44.6	116.0	92.9

Tomada de Vadoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). *Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns.*

Como se esperaba el espécimen N exhibió la mejoría más baja en las características estructurales (al comparar con los especímenes fortalecidos). Sin embargo, debe destacarse que, hasta la etapa de carga máxima, las diferencias fueron insignificantes.

Al comparar los resultados de los especímenes reforzados y los no reforzados, es obvio que el encamisado en concreto reforzado ofrece una mejora significativa de las características estructurales (rigidez, resistencia y capacidad de desplazamiento)

La resistencia máxima del espécimen N ocurrió cuando el desplazamiento fue de 20 mm, que fue mucho antes que el de los otros especímenes fortalecidos.

La resistencia máxima del espécimen N fue similar a la del espécimen W (que también tenía una baja resistencia del encamisado de concreto) pero fue significativamente menor que la del espécimen E. Este mal comportamiento en lo que respecta a la ductilidad puede atribuirse a la mala conexión de la interfaz

El espécimen W experimentó una ductilidad muy buena a pesar de que la resistencia del concreto del encamisado era baja y no había una preparación especial en la interfaz (como fue el mismo para el espécimen N). Esto demuestra la contribución significativa de los conectores de acero doblados.

La mejora en la rigidez es obvia cuando se comparan las muestras reforzadas con la columna no reforzada, incluso en el caso de la muestra N. En todas las etapas de la prueba, para el mismo desplazamiento impuesto, la rigidez de todas las muestras reforzadas es tres veces mayor que la rigidez del espécimen no fortalecido.

2.2.1.4. Análisis de los costos y tiempos de ejecución

2.2.1.4.1. Procedimiento constructivo.

Para realizar el análisis de los costos y tiempos se contactó a un asesor de la empresa Toxement, éste recomienda el siguiente procedimiento constructivo para ejecutar un reforzamiento mediante un encamisado de concreto reforzado. Se procede a retacar con tacos metálicos alrededor de la columna afectada, inicia la demolición del recubrimiento, perforación para la colocación de los conectores entre la columna existente y la nueva (para garantizar el anclaje se utiliza Euco Dural o equivalente), armado del acero de refuerzo

longitudinal y transversal, aplicación de un imprimante tipo Epotoc o equivalente para garantizar adherencia entre los concretos, colocación de formaleta metálica hasta 10 cm por debajo de la altura de la columna para permitir el ingreso adecuado del concreto, el cual en vez de ser preparado con cemento de uso estructural deberá ser un mortero de reparación fluido y sin retracción tipo Hi Flow Grout o equivalente. Los últimos 10 cm de la columna, se vacían como se indicó en el procedimiento anterior, simplemente que, en vez de formaleta metálica, se puede utilizar un pequeño armazón en madera convencional dejando un chaflán en una de las caras para poder ingresar la mezcla.



Ilustración 15. *Proceso constructivo de encamisado en concreto*

Fotografía de autoría propia. Proyecto “Relleno sanitario La Pradera - Reforzamiento de pórtico”

2.2.1.4.2. *Equipos*

- Tacos metálicos
- Andamios multidireccionales
- Taladro Demoledor de muro 110V
- Formaleta para columnas
- Vibrador eléctrico de aguja a 110 v
- Concretadora 2.0 sacos eléctrica 220 v

2.2.1.4.3. Materiales

- Acero de refuerzo longitudinal
- Acero de refuerzo transversal (Estribos)
- Conectores de acero de refuerzo
- EUCO DURAL 452 GEL *1600 C.C. 1249 (Sistema epóxico para anclajes)
- EPOTOC 1-1*2KG.1737 (Adhesivo epóxico para pega de concreto nuevo a endurecido)
- HI FLOW GROUT*30KG.1144 (Relleno sin contracciones con alto tiempo de manejabilidad)
- Triturado ¾"

2.2.1.4.4. Costo de ejecución

Se realiza un análisis básico para una columna de sección cuadrada de 30 cm x 30 cm y una altura de 3 m.

Tabla 4. Presupuesto de encamisado en concreto

Material	Unidad	Duración	Cantidad	Vlr unitario	Vlr Total
Acero de refuerzo	kg	-	57.31	\$ 3.570	\$ 204.594
Euco Dural 452 gel*16000c.c.1249	unidad	-	1	\$ 60.552	\$ 60.552
Triturado ¾"	m3	-	0.0693	\$ 130.000	\$ 9.009
Epotoc 1-1*2kg.1737	unidad	-	2	\$ 105.735	\$ 211.470
Hi flow grout*30kg.1144	bolsa	-	13	\$ 66.134	\$ 859.745
Tacos metálicos	día	8	8	\$ 226	\$ 14.470
Andamios multidireccionales	día	8	1	\$ 33.320	\$ 266.560
Taladro demolidor de muro 110V	día	8	1	\$ 39.270	\$ 314.160
Formaleta para columnas	día	8	1	\$ 23.443	\$ 187.544
Vibrador eléctrico de aguja a 110 V	día	8	1	\$ 21.420	\$ 171.360
Concretador a de 2.0 sacos eléctrica 220V	día	8	1	\$ 28.560	\$ 228.480
Transporte equipos	gl	-	2	\$ 60.000	\$ 120.000
Transporte material	gl	-	1	\$ 60.000	\$ 60.000
Cuadrilla (1 Of + 3 Ay)	día	8	1	\$ 230.000	\$ 1.840.000
				Σ	\$ 4.547.945

Notas al presupuesto:

- Los productos presentados son referenciales y pueden ser sustituidos por una referencia equivalente de cualquier otra marca.
- El valor unitario indicado de los materiales, incluye el IVA.
- La columna inicial es de 30x30 cm, el crecimiento de la sección es de 10 cm, obteniendo una columna de 40x40 cm.
- El desperdicio para cualquier tipo de material se considera del 10%.
- Para el acero de refuerzo, se considera 4 barras #6 de longitud 4.1 m (se consideran longitud de anclaje y traslape), 12 barras #3 de longitud 0.25 m (3 conectores por cara) y 15 estribos #3 de longitud 1.64 m espaciados cada 0.20 m.
- La cantidad del material, esta aproximada a la presentación mínima de venta por el proveedor. Ejemplo:
 - La empresa Toxement indica que la presentación del Euco Dural por 600 ml, permite rellenar 15 perforaciones de 20 cm de profundidad, por ende solo se necesita una unidad de este producto.
 - La empresa Toxement recomienda que, para una mezcla fluida, se debe mezclar el 30% de triturado del volumen total a vaciar.

$$((0.4 * 0.4) - (0.3 * 0.3)) * 3 * 1.1 * 0.3 = 0.0693m^3$$

- El rendimiento del Epotoc es de 700 g/m², los m² para aplicar son:

$$0.3 * 3 * 4 * 1.1 = 3.96m^2$$

Para 3.96 m², se requieren 2772 gramos, que son aproximadamente 3 kg, como la presentación del producto viene por dos kg, se necesitan dos unidades.

- El rendimiento de Hi flow grout, para una mezcla fluida es de 1.63 kg/l, la cantidad requerida para una columna es de 231 litros, que equivalen a 376.53 kg del producto. Dado que la presentación es por 30 kg, se requiere 13 bultos.
- Algunos equipos no se requieren durante todo el periodo de reforzamiento, sin embargo, se considera recoger todos los equipos el mismo día dado que el tiempo de ejecución es relativamente corto.

2.2.1.4.5. Tiempo de ejecución por sub actividades.

Tabla 5. Tiempo de ejecución de encamisado de concreto

Actividades	Días							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Colocación de tacos metálicos	■							
Demolición de recubrimiento	■	■						
Perforación para anclajes		■						
Colocación de anclajes con Euco Dural		■						
Armado de refuerzo long. y transv.		■						
Aplicación de Epotoc			■					
Armado de formaleta metálica			■					
Vaciado con Hi Flow Grout			■					
Desencofrado				■				
Armado y vaciado de 10 cm restantes				■				
Curado					■	■	■	
Quitar tacos metálicos								■

Nota: El Hi Flow Grout a los 3 días y siendo una mezcla fluida, permite una resistencia 37 Mpa “Tomado de ficha técnica del producto – Toxement”

2.2.2. Encamisado en acero o platinas metálicas

2.2.2.1. Definición del método de reforzamiento.

Existen varios tipos de encamisado en acero para columnas de concreto reforzado. Por lo general, implican envolver placas de acero, tiras de acero o barras de acero en la dirección transversal. Parte de la superficie del concreto a veces se retira antes de la ejecución del reforzamiento (Wu, Y. F, Liu, T, & Oehlers, D. J, 2006). El tipo de encamisado de acero a tratar en la monografía, es el revestimiento de la columna de concreto reforzado con placas o platinas de acero.

En la presente monografía se mencionan algunas de las configuraciones típicas de reforzamiento en acero, en las cuales la columna RC está encerrada o envuelta por una placa de acero alrededor de la cara externa de la columna como se presenta en la Ilustración 16. Se analizan dos tipos de configuración de reforzamiento en acero, conformados por dos placas en forma de L como los Tipos 1 y 2 (Ver Ilustración 16) alrededor de la columna, que luego

se sueldan o atornillan para proporcionar un encamisado transversalmente continuo (Wu, Y. F., Liu, T., & Oehlers, D. J., 2006). El espacio entre la placa de acero y la cara de la columna es rellenado con mortero fluido sin retracción. También es un método común la configuración Tipo 3 (Ver Ilustración 16), implementando ángulos de acero, colocados en las esquinas de la columna y soldados a las placas de acero para conformar el encamisado.

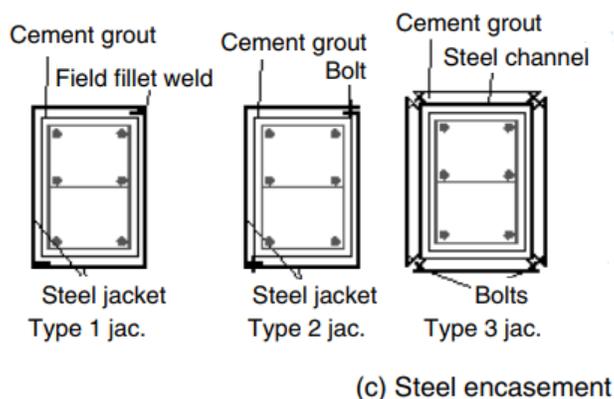


Ilustración 16. Tipos de encamisado en acero.

Tomado de Wu, Y. F., Liu, T., & Oehlers, D. J. (2006). *Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing.*

2.2.2.2. Investigación de pruebas experimentales.

Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A. (2015), realizaron un programa experimental del comportamiento de las columnas de concreto reforzado con siete especímenes de columnas, con sección transversal de 200 · 200 mm y altura de 1200 mm. Dos de los especímenes no tenían encamisado y el resto se encontraban reforzados con diferentes configuraciones de encamisado de acero pero con la misma área transversal horizontal total. La Ilustración 17 muestra las dimensiones de los especímenes y sus configuraciones de encamisado de acero.

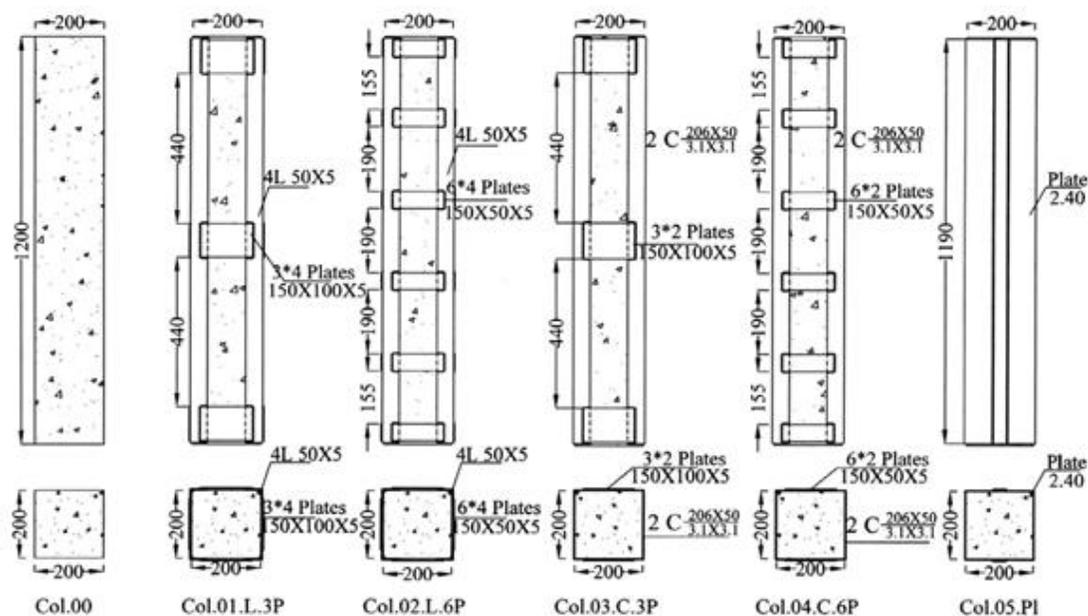


Fig. 1 Specimen dimensions and steel jacket configuration.

Ilustración 17. Dimensiones de especímenes y sus configuraciones de encamisado de acero.

Tomado de Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A. (2015). Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket.

Como sostienen Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A. (2015), la investigación demostró que los diferentes esquemas de fortalecimiento tienen un impacto importante en la capacidad de la columna. Por lo que en la presente monografía se referencian y analizan los resultados obtenidos de la Ilustración 18 y la Tabla 6.

La Ilustración 18 presenta las curvas fuerza – desplazamiento, realizadas con los resultados de los especímenes sometidos a carga axial y en la Tabla 6 se relacionan las cargas de falla con su respectivo desplazamiento.

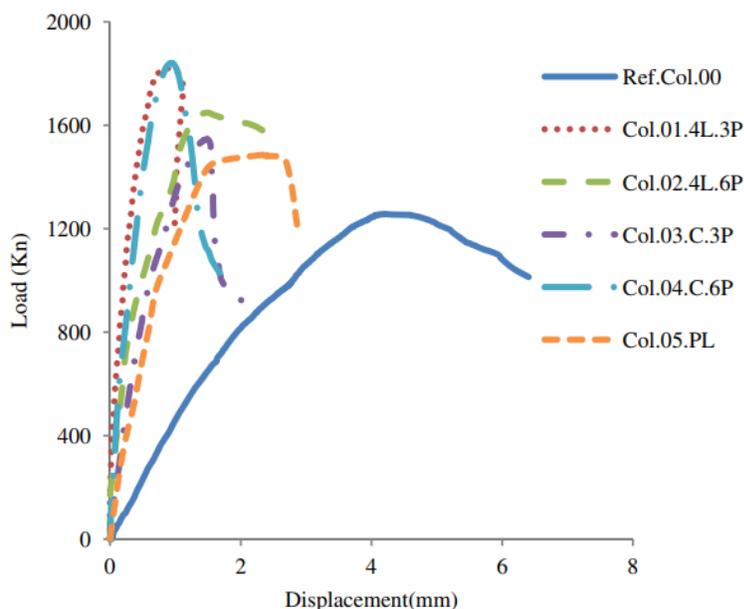


Ilustración 18. Curvas fuerza - desplazamiento de especímenes con encamisado de acero.

Tomado de Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A. (2015). Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket.

Tabla 6. Cargas de falla y desplazamientos de especímenes con encamisado de acero.

Specimen	Failure Load P_u (kN)	Disp. δ (mm)
Col.00 (Ref. specimen)	1215	4.10
Col.01.L.3P	1918	1.07
Col.02.L.6P	1679	1.96
Col.03.C.3P	1609	1.79
Col.04.C.6P	1862	1.24
Col.05.PI	1516	2.20

Tomado de Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A. (2015). Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket.

Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017) realizaron la investigación de varios métodos de reforzamiento para columnas de concreto reforzado, incluyendo la técnica de

revestimiento con acero. En esta investigación analizan el comportamiento y los resultados de falla de especímenes sometidos a cargas de cortante, flexión - cizalladura y carga cíclica, e implementan dos estrategias de reforzamiento en los especímenes: reforzamiento parcial en la zona de articulación plástica (serie FS) con el objetivo de aumentar la capacidad de deformación, y el reforzamiento completo (serie S) con el objetivo de aumentar tanto la resistencia al cizallamiento como la deformación. En la Tabla 7 se indica el tipo y zona de encamisado implementado en cada uno de los especímenes y en la Ilustración 20 se relacionan los resultados de cargas laterales y deformaciones que obtuvieron los autores en su investigación.

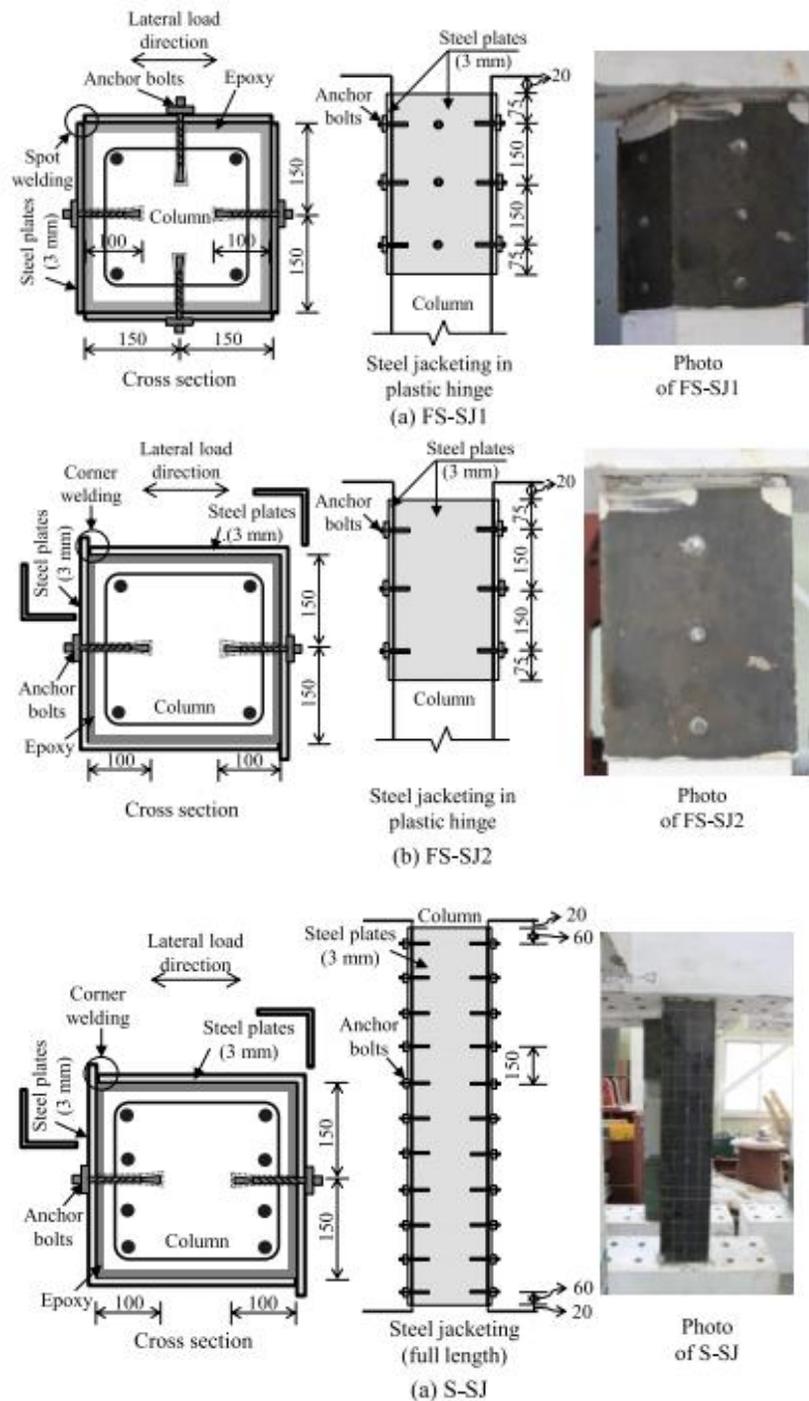
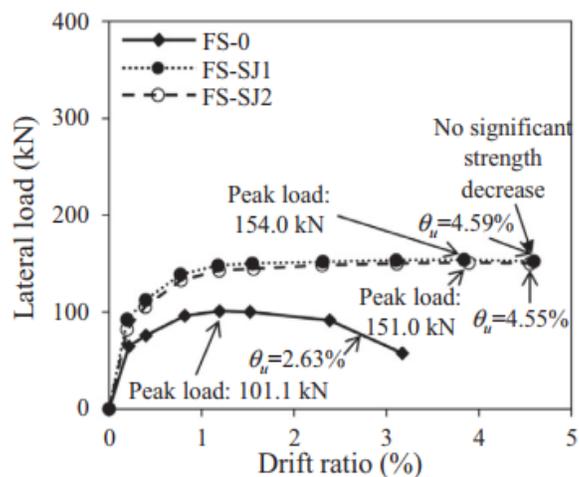
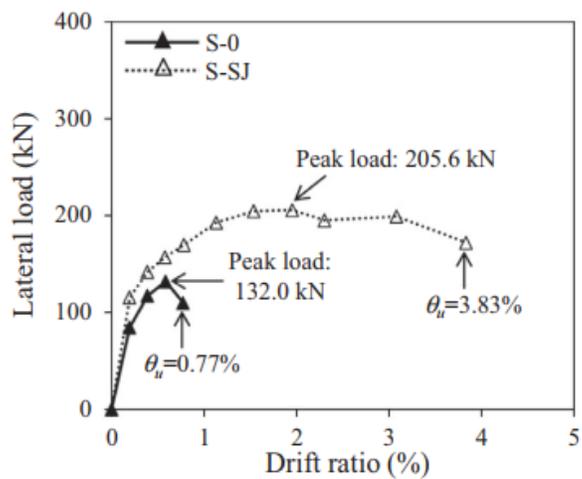


Ilustración 19. Configuración de especímenes con revestimiento de acero

Tomado de Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017). *Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods.*



(a) Steel jacketing in plastic hinges



(d) Steel jacketing in entire columns

Ilustración 20. Cargas laterales y deformaciones de especímenes con encamisado de acero.

Tomado de Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017). *Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods.*

Tabla 7. Tipo y zona de encamisado implementado en cada uno de los especímenes con encamisado de acero ensayados por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017)

Muestra	Tipo de encamisado	Zona de encamisado
FS-0, S-0	Sin revestimiento	
FS-SJ1	Placas de acero (3 mm) + 4 pernos de anclaje laterales	Articulación plástica
FS-SJ2	Platinas de acero en forma de L (3 mm) + 2 pernos de anclaje laterales	Articulación plástica
S-SJ	Platinas de acero en forma de L (3 mm) + 2 pernos de anclaje laterales	Longitud total de columna

De la gráfica anterior, se obtienen los resultados de la Tabla 8 para las muestras ensayadas.

Tabla 8. Porcentaje de incremento de resistencia a carga lateral y de la capacidad a la deformación de los especímenes con encamisado de acero ensayados por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017)

Serie de muestra	% Incremento Resistencia Carga Lateral	% Incremento Capacidad Deformación
FS	50,8%	73,8%
S	55,8%	397,4%

2.2.2.3. Análisis de los resultados del comportamiento estructural.

De la Ilustración 18 y Tabla 6 obtenidos de la investigación de Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A. (2015), se interpreta que cualquiera de las configuraciones de encamisado de acero incrementa la resistencia de la columna ante carga axial, obteniéndose para este caso un incremento de capacidad de carga como mínimo del 25% y máximo del 58%.

A partir de la investigación de los autores Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017) y los resultados relacionados en la Ilustración 20, se obtuvieron los siguientes datos de la carga máxima y la capacidad de deformación en las columnas de concreto reforzado con revestimiento en acero: en los especímenes con reforzamiento parcial en la zona de articulación plástica (serie FS) la capacidad de deformación aumentó en promedio 73,8%, y en los especímenes con reforzamiento completo (serie S) la resistencia al corte y la capacidad de deformación aumentaron 55,8% y 397,4%, respectivamente, todo comparado con el espécimen sin encamisado. Se infiere entonces, que esta técnica de revestimiento permite el mejoramiento de la resistencia al corte y de la capacidad de deformación para las columnas de concreto reforzado. De acuerdo a los resultados del estudio de Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A. (2015) el encamisado en acero incrementa la resistencia a la flexión de la columna de concreto reforzado.

En las columnas modificadas, el daño, incluido el aplastamiento y el agrietamiento del concreto, disminuyó significativamente a simple vista, y las barras longitudinales cedieron, lo que indujo el modo de falla dúctil.” Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017).

2.2.2.4. Análisis de los costos y tiempos de ejecución

2.2.2.4.1. Procedimiento constructivo.

Se toma de referencia el montaje de encamisado en acero en toda la longitud de la columna realizado y analizado por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017), el cual se muestra en la ilustración 21. Se utilizan platinas metálicas en forma de L y se ensamblan a las caras de la columna después de recubrirlas con una capa adhesiva epóxica. Luego se instalan los pernos de anclaje a través de los agujeros pre taladrados con una longitud de 100 mm en las columnas de concreto, instalándose dos lados de las platinas de acero con una línea vertical de pernos de anclaje. Finalmente, los extremos libres de las platina de acero se sueldan entre sí.

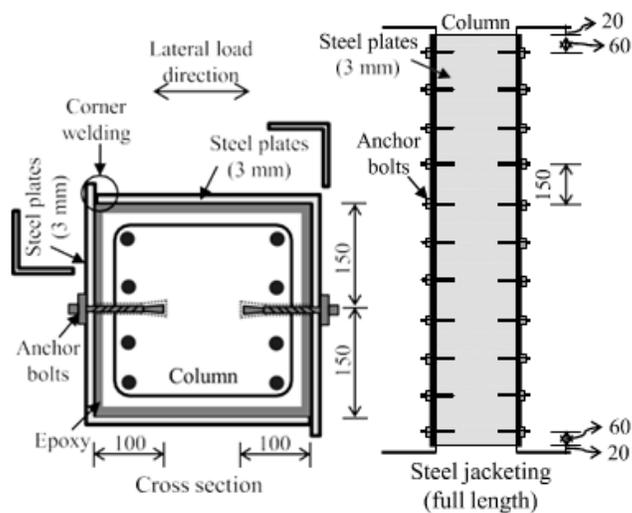


Ilustración 21. Detalle de montaje de encamisado en acero.

Tomado de Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017). *Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods.*

2.2.2.4.2. Equipos

- Taladro Demoledor de muro 110V
- Equipo de soldadura
- Aplicador de anclaje

2.2.2.4.3. Materiales

- Platinas de acero en forma de L (3 mm)
- Pernos de anclaje HILTI HSL-3 M10 / 20 o equivalente
- Adhesivo Epóxico Sikadur 30 o equivalente
- Electrodo para soldadura

2.2.2.4.4. Costo de ejecución.

Se realiza un análisis básico para una columna de sección cuadrada de 30 cm x 30 cm y una altura de 3 m.

Tabla 9. Presupuesto de encamisado en acero

Platinas de Acero 3 mm	
Peso platina (kg/m)	30
Peso platinas (kg)	90
Costo platina (\$/kg)	\$ 8.747
Costo Platinas	\$ 787.185

Anclaje Pernos HILTI HSL-3 M10 / 20	
Cantidad anclajes (un)	40
Costo perno anclaje (\$/un)	\$ 75.902
Costo instalación anclaje (\$/in)	\$ 15.000
Costo Anclajes	\$ 3.636.071

Adhesivo Epóxico Sikadur 30	
Sikadur 30 x 6kg	\$ 464.332
Consumo (kg/m)	9,6
Cantidad adhesivo (kg)	28,8
Cantidad requerida (un)	5
Costo adhesivo epóxico	\$ 2.321.660

Transporte y montaje	\$ 50.000
-----------------------------	------------------

Costo encamisado acero/Columna	\$ 6.794.916
---------------------------------------	---------------------

Notas al presupuesto:

- Los productos presentados son referenciales y pueden ser sustituidos por una referencia equivalente de cualquier otra marca.
- La columna inicial es de 30x30 cm y el crecimiento de la sección es de 6 mm.
- El desperdicio para cualquier tipo de material se considera del 10%.
- La empresa Sika indica que la presentación del Sikadur 30 tiene un consumo de 0,80 kg/m por cada 100 mm de ancho de platina, siendo para la sección 9,6 kg/m. La cantidad requerida para una columna es de 28,8 kg del producto. Dado que la presentación es por 6 kg, se requiere 5 unidades.
- El costo de los pernos de anclaje HILTI HSL-3 M10 / 20 se presenta en la Ilustración 23.

Código		↑ Tamaño de anclaje	↑ Longitud de anclaje	↑ Cantidad del embalaje	Precio sin I.V.A ↑ *Sujeto a cambio sin previo aviso
Ancl grandes cargas HSL-3 M10/20 Código 371778 Más detalles >	• 1x Ancl grandes cargas HSL-3 M 10/20 cpl	M10	110 mm	20 un	\$1.275.660,00 / 20 un

Ilustración 22. Costo de Pernos de anclaje HILTI HSL-3 M10 / 20

Tomada de página Web <https://www.hilti.com.co>

2.2.2.4.5. *Tiempo de ejecución por sub actividades.*

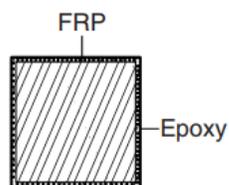
Tabla 10. Tiempo de ejecución de encamisado de acero

Actividades	Días			
	1	2	3	4
Limpieza de la superficie de concreto				
Aplicación de adhesivo epóxico				
Colocación de platinas				
Instalación de pernos				
Soldadura de platinas				

2.2.3. Revestimiento con polímeros reforzados de fibra de carbono

2.2.3.1. Definición del método de reforzamiento.

Como explica Wu, Y. F, Liu, T, & Oehlers, D. J (2006), las camisas de polímeros reforzados de fibra (FRP) se forman al unir el carbono continuo, el vidrio, la aramida u otras fibras sintéticas y la lámina de fibra o la placa de fibra a la cara de la columna con una matriz de epóxico, viniléster o poliéster, como se muestra en la Ilustración 23. Similar a las camisas de acero, la función principal de la cubierta transversal continua es proporcionar confinamiento al concreto. En la presente monografía se realiza el análisis de las columnas con encamisado de polímeros reforzados de fibra de carbono (CFRP).



(b) Composite jacket

Figure 4. Other types of jacket**Ilustración 23.** Encamisado FRP.

Tomado de Wu, Y. F., Liu, T., & Oehlers, D. J. (2006). *Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing*

2.2.3.2. Investigación de pruebas experimentales.

Parvin, A., & Brighton, D. (2014), presentan diferentes ejemplos de datos experimentales sobre el efecto del reforzamiento de FRP de columnas cargadas axialmente. En la Tabla 11 se relacionan los resultados de las columnas encamisadas con CFRP que son las de nuestro interés, donde se observan los porcentajes de incremento de la capacidad de carga axial con el reforzamiento y la deformación de ruptura de los materiales, obtenidos de las pruebas de tracción estándar de láminas de FRP. El modo final de falla para todas las muestras fue la ruptura del FRP.

Tabla 11. Datos experimentales representativos sobre columnas reforzadas con CFRP bajo carga axial.

Authors	Test ID	Retrofit	Load Increase (%)	FRP Ultimate Stain mm/mm
Matthys <i>et al.</i> [4]	K2	CFRP	59.2	0.012
	K3	CFRP	59.9	0.002
Toutanji <i>et al.</i> [6]	K9	CFRP	14.9	0.0131
	K10	CFRP	8.5	0.0131
	K11	CFRP	6.4	0.0129

Tomada de Parvin, A., & Brighton, D. (2014). *FRP composites strengthening of concrete columns under various loading conditions.*

Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017) realizan la investigación de la técnica de revestimiento de columnas de concreto reforzado con CFRP. Como se dijo anteriormente, en esta investigación implementan dos estrategias de reforzamiento en los especímenes: reforzamiento parcial en la zona de la articulación plástica (serie FS) con el objetivo de aumentar la capacidad de deformación, y el reforzamiento completo (serie S) con el objetivo de aumentar tanto la resistencia al cizallamiento como a la deformación. En la Ilustración 24 se presenta la configuración de los especímenes con revestimiento de CFRP ensayados por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017), en la Tabla 12 se indica el tipo de revestimiento implementado y en la Ilustración 25 se relacionan los resultados de cargas laterales y deformaciones que obtuvieron los autores en su investigación.

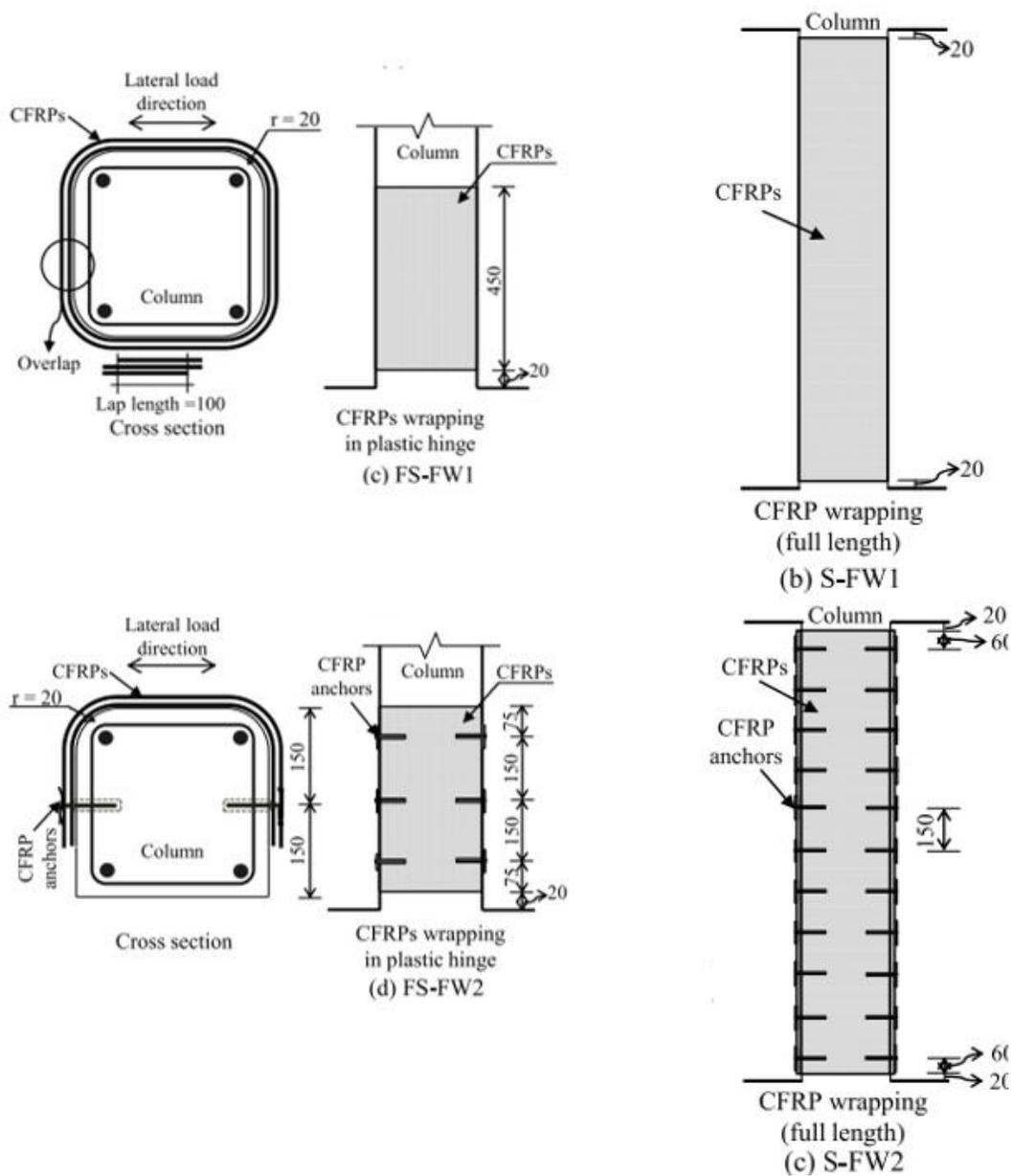


Ilustración 24. Configuración de especímenes con revestimiento de CFRP

Tomado de Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017). *Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods.*

Tabla 12. Tipo y zona de encamisado implementado en cada uno de los especímenes con revestimiento de CFRP ensayados por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017)

Muestra	Tipo de encamisado
0	Sin revestimiento
FW1	Completo. Dos capas de CFRP.
FW2	Revestimiento en tres lados en forma de U con fijación con línea vertical de tres anclajes CFRP al final. Dos capas de CFRP.

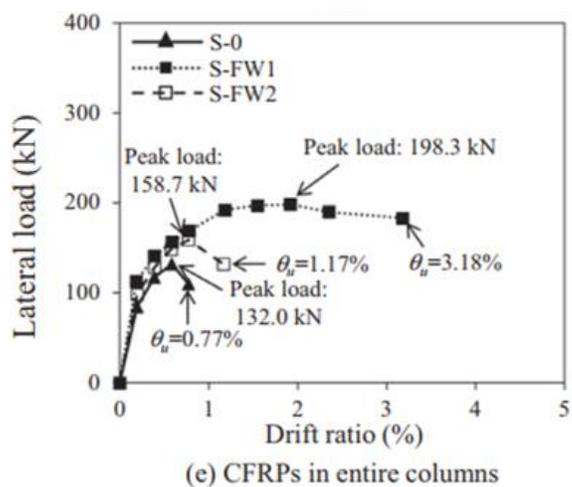
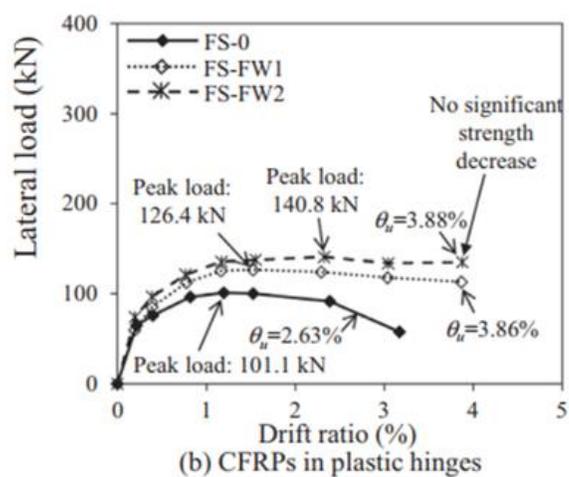


Ilustración 25. Cargas laterales y deformaciones de especímenes con revestimiento de CFRP.

Tomado de Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017). Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods.

De la gráfica anterior, se obtienen los resultados de la Tabla 13 para cada una de las muestras ensayadas.

Tabla 13. Porcentaje de incremento de resistencia a carga lateral y de la capacidad a la deformación de los especímenes con revestimiento de CFRP ensayados por Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017)

Muestra	% Incremento Resistencia Carga Lateral	% Incremento Capacidad Deformación
FS – FW2	25,0%	46,8%
FS – FW2	39,3%	47,5%
S – FW1	50,2%	313,0%
S – FW2	20,2%	51,9%

2.2.3.3. Análisis de los resultados del comportamiento estructural.

En los datos experimentales representativos del artículo Parvin, A., & Brighton, D. (2014), el rango de aumento en las capacidades de carga axial de las columnas con CFRP varió de 6.4% a 59.9% y la deformación por ruptura de los materiales varió de 1.5% a 2.0%. Aunque en algunos casos el incremento es bajo, existe un aumento en la capacidad de carga axial de las columnas con CFRP. Según Parvin, A., & Brighton, D. (2014), el aumento depende de varias variables, incluidas las propiedades y la cantidad de refuerzo de FRP, la resistencia del hormigón, la forma de la sección transversal de la columna y el nivel de carga axial.

Al analizar los resultados de la Tabla 13 realizada a partir de los ensayos de Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017), se interpreta que la técnica de revestimiento con CFRP permite el mejoramiento de la resistencia al corte y de la capacidad de deformación para las columnas de concreto reforzado. Se observa un alto incremento en la capacidad de deformación de las columnas con revestimiento en toda su longitud con encamisado completo y un bajo incremento en la resistencia a carga axial de las muestra con revestimiento en los tres lados (en forma de U) con fijación con de tres anclajes CFRP al final. En general

las muestras con revestimiento completo tuvieron un mejor comportamiento para los dos parámetros analizados.

Ozcan O, Binici B, Ozcebe G. (2010) ensayaron cinco columnas de concreto, que fueron revestidas con láminas de CFRP y fijadas con anclajes, para investigar el efecto de la relación de confinamiento y la configuración del anclaje en el rendimiento sísmico de las columnas de concreto después de la adaptación bajo carga cíclica. Los resultados de la prueba mostraron que las columnas de concreto estaban efectivamente confinadas lo que mejora la capacidad de deformación y la capacidad de carga.

Parvin, A.; Wang, W. (2001) estudiaron los efectos del espesor del encamisado y diversas excentricidades en las columnas cuadradas de concreto reforzadas con CFRP. Sus hallazgos indicaron que el encamisado de FRP es efectivo en el reforzamiento de columnas cargadas excéntricamente. Sin embargo, su eficiencia es proporcional a la rigidez del encamisado de FRP y se reduce debido al gradiente de deformación en la columna.

2.2.3.4. Análisis de los costos y tiempos de ejecución

2.2.3.4.1. Procedimiento constructivo.

Para realizar el análisis de los costos se contactó a un asesor de la empresa Toxement, este recomienda el siguiente procedimiento constructivo para ejecutar un reforzamiento mediante FRP: Se procede a retacar con tacos metálicos alrededor de la columna afectada, demoler y redondear las esquinas, limpieza de la superficie por medio del método de abrasión, aplicar en todas las caras de la columna un epóxico para adherir los tejidos de fibra de carbono “Duralcrete ESR”, colocar en todo el perímetro el tejido en fibra de carbono de 300 gr/m² “Euco Carbon Fiber CFS 300”, este último se debe traslapar como mínimo 12 cm. Como el ancho del Euco Carbon Fiber CFS 300 es de 50 cm, para una columna de 3 m de altura, se deben colocar aproximadamente 7 capas con una longitud de 1.35 m, traslapando verticalmente como mínimo 10 cm, por último se vuelve aplicar una mano de Duralcrete ESR sobre el tejido para protegerlo y se le da el acabado deseado a la columna.



Ilustración 26. *Proceso constructivo de recubrimiento en CFRP*

Tomado de Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017). Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods.

2.2.3.4.2. *Equipos*

- Tacos metálicos
- Andamios multidireccionales
- Taladro Demoledor de muro 110V

2.2.3.4.3. *Materiales*

- Arena de sílice
- DURALCRETE ESR (Epóxico para los tejidos de fibra de carbono)
- EUCCO CARBON FIBER CFS 300 (Tejido en fibra de carbono de 300 gr/m² – Alta resistencia)

2.2.3.4.4. Costo de ejecución.

Se realiza el análisis para una columna de sección cuadrada de 30 cm x 30 cm y una altura de 3 m.

Tabla 14. Presupuesto de recubrimiento en CFRP

Material	Unidad	Duración	Cantidad	Vlr unitario	Vlr Total
Duralcrete ESR	galón	-	4	\$ 166.005	\$ 664.020
Euco Carbon Fiber CFS 300	m2	-	10	\$ 193.375	\$ 1.933.750
Arena de sílice	Bulto	-	3.3	\$ 87.200	\$ 287.760
Tacos metálicos	día	2	8	\$ 226	\$ 3.618
Andamios multidireccionales	día	2	1	\$ 33.320	\$ 66.640
Taladro Demolidor de muro 110V	día	2	1	\$ 39.270	\$ 78.540
Transporte equipos	gl	-	2	\$ 60.000	\$ 120.000
Transporte Material	gl	-	1	\$ 60.000	\$ 60.000
Cuadrilla (1 Of + 1 Ay)	día	2	1	\$ 130.000	\$ 260.000
				Σ	\$ 3.474.328

Notas al presupuesto:

- Los productos presentados son referenciales y pueden ser sustituidos por una referencia equivalente de cualquier otra marca.
- El desperdicio para cualquier tipo de material se consideró del 10%
- La cantidad del material, esta aproximada a la presentación mínima de venta por el proveedor. Ejemplo:
 - Para esta columna se necesitan 3.96 m2 de “Euco Carbon Fiber CFS 300” y considerando un 10% de desperdicio, pero la presentación más pequeña es por 10 m2.
 - Para esta columna se necesitan 7.92 m2 (2 manos, una antes de colocar el tejido y otras después) de Duralcrete ESR y considerando un 10% de desperdicio, el material tiene un rendimiento de 5.57 m2/gl, por lo anterior se requieren 1.42 gl, pero la presentación mínima viene por 4 gl.
- Algunos equipos no se requieren durante todo el periodo de reforzamiento, sin embargo, se considera recoger todos los equipos el mismo día dado que el tiempo de ejecución es relativamente corto.

2.2.3.4.5. *Tiempo de ejecución por sub actividades.*

Tabla 15. Tiempo de ejecución de revestimiento en CFRP

Actividades	Días							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Colocación de tacos metálicos								
Redondeo de aristas de columnas								
Limpieza de la superficie "Abrasión"								
Aplicación de Duralcrete								
Colocación de Euco								
Aplicación de Duralcrete								

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se realiza una matriz de comparación de las variables de resistencia, durabilidad, rigidez, costos, tiempos y estética para las diferentes técnicas de reforzamiento.

Tabla 16. Matriz de comparación de diferentes técnicas de reforzamiento

Método de reforzamiento	Efecto en la capacidad	Efecto en la rigidez	Tiempos de ejecución	Costo del reforzamiento	Estética e impacto a la arquitectura	Efecto en la durabilidad
Encamisado en concreto reforzado	Aumenta	Aumenta	Muy Alto	Alto	Muy alto	Aumenta
Encamisado en acero o platinas metálicas	Aumento significativo	Aumenta	Bajo	Alto	Moderado	Aumento significativo
Revestimiento con polímeros reforzados de fibra de carbono	Aumenta	No aumenta	Bajo	Moderado	Bajo	Moderado

- En la Tabla 17 se relacionan las ventajas y desventajas de las diferentes técnicas de reforzamiento, en cuanto a variables de fuerza, ductilidad, durabilidad, disponibilidad y demás.

Tabla 17. Ventajas y desventajas de las diferentes técnicas de reforzamiento.

Método de reforzamiento	Ventajas	Desventajas
Encamisado en concreto reforzado.	Material comunmente usado / disponible.	Costoso, implica mucho trabajo y tiempo debido a la instalación del encofrado y la formaleta.
	Familiaridad de ingenieros en ejercicio con el material.	Cambio en el tamaño de la sección transversal llevando a un cambio en la rigidez y demandas sísmicas.
	Capacidad del concreto reforzado para tomar cualquier forma.	Ocupa mayor espacio, modificando los espacios arquitectónicos.
	Aumenta tanto de la capacidad como la ductilidad.	Material muy pesado
	El aumento de la ductilidad es muy bueno siempre y cuando se garantice un buen detallado del refuerzo.	-
Encamisado en acero o platinas metálicas.	Material comunmente usado / disponible.	Costoso e implica mucho trabajo su instalación
	Aumenta tanto la capacidad como la ductilidad, debido a las excelentes características del confinamiento de la columna.	Susceptible a oxidación y corrosión.
	-	Cambio en el tamaño de la sección transversal llevando a un cambio en la rigidez y demandas sísmicas.
	-	Material muy pesado
Revestimiento con polímeros reforzados de fibra de carbono	Facilidad y rapidez de instalación.	Material costoso (pero el costo total es bajo debido al rápido proceso de instalación y transporte).
	Resistencia a la corrosión.	Bajas propiedades ante la exposición de altas temperaturas y ambiente húmedo.
	Modificación mínima de la geometría y estética de la estructura.	El aumento de la capacidad es relativamente pequeño.
	Interrupción mínima de la ocupación y espacios arquitectónicos.	-
	Alta durabilidad, alta relación de la resistencia y bajo peso.	-
	Mejor seguridad laboral y mínimo riesgo en la ejecución.	-
	Aumenta de la capacidad y ductilidad del elemento.	-

- Aunque en temas de reforzamiento, prima la funcionabilidad sobre lo estético, este último se ha vuelto un factor importante, puesto que el aspecto y lo que se ve influye mucho en el entorno. Es por esto que, aunque el encamisado en concreto se pueda

revocar y estucar, el aumento de la sección reduce el área y distribución de la arquitectura, siendo algo molesto e incómodo. Evidentemente ver unos elementos metálicos sobre las columnas, no debe ser de agrado para las personas que les toque de vecino este elemento estructural con este tipo de reforzamiento. Y por último las fibras debido a su apariencia podría pasar por desapercibido, sumado a que es un reforzamiento que no necesita mucho espacio, sin afectar las áreas y distribución de la arquitectura.

- La durabilidad para los métodos de reforzamiento de acero y concreto, aumenta notablemente, pues los materiales con los que se realiza dicho reforzamiento tiene características de dureza notables, a diferencia de las fibras de carbono, que los materiales utilizados son más flexibles y pueden ser afectados fácilmente por el entorno, y es por esto que su aumento no es tan grande como el de los otros dos reforzamientos.
- La revisión de los hallazgos de diferentes investigadores lleva a concluir que, aunque la resistencia y la ductilidad de las columnas dañadas pueden recuperarse con las técnicas de reforzamiento, incluso pueden mejorar su comportamiento con la reparación.
- Comparando el costo de ejecución de los métodos de reforzamiento, se concluye que el encamisado en CFRP es el más económico y el revestimiento en acero es el más costoso.
- La técnica de revestimiento en acero o platinas metálicas tienen un alto rendimiento, brindando beneficios para un proyecto que requiere velocidad de instalación.
- En comparación con el revestimiento de hormigón, las ventajas del revestimiento de acero son: un aumento menor en las dimensiones de la sección transversal, facilidad y velocidad de construcción, menor costo de intervención estructural e interrupción de uso de la edificación.
- En comparación con el encamisado de concreto y de acero, el CFRP tiene ventajas constructivas, en cuanto a facilidad de instalación, mantenimiento reducido, alta resistencia y mejor rendimiento de fatiga, así como peso ligero y buena durabilidad.

- Con base en la revisión de las diferentes técnicas de reforzamiento y reparación, el método de revestimiento con polímeros reforzados de fibra de carbono, son los más efectivos, y que tienen un rendimiento relativamente rápido en la instalación, puede mejorar significativamente la resistencia, la ductilidad, la deriva y mantener la estética y geometría (configuración inicial de la estructura).

4. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Truong, G. T., Kim, J. C., & Choi, K. K. (2017). Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by various methods. *Engineering Structures*, 134, 217-235.
- (2) Belal, M. F., Mohamed, H. M., & Morad, S. A. (2015). Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket. *HBRC Journal*, 11(2), 201-212.
- (3) Mirmiran y Shahawy 1997a; Saafi et al . 1999
- (4) Wu, Y. F., Liu, T., & Oehlers, D. J. (2006). Fundamental principles that govern retrofitting of reinforced concrete columns by steel and FRP jacketing. *Advances in Structural Engineering*, 9(4), 507-533.
- (5) Vандoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2008). Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns. *Construction and Building Materials*, 22(3), 264-276.
- (6) Parvin, A., & Brighton, D. (2014). FRP composites strengthening of concrete columns under various loading conditions. *Polymers*, 6(4), 1040-1056.
- (7) Parvin, A.; Wang, W. (2001). Behavior of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading. *J. Compos. Constr.* 2001, 5, 146–152.
- (8) Ozcan O, Binici B, Ozcebe G. (2010). Seismic strengthening of rectangular reinforced concrete columns using fiber reinforced polymers. *Eng Struct* 32 (4):964–73.
- (9) Raza, S., Khan, M. K., Menegon, S. J., Tsang, H. H., & Wilson, J. L. (2019). Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Columns by Jacketing: State-of-the-Art Review. *Sustainability*, 11(11), 3208
- (10) HILTI (2019) Manual Técnico de Anclaje. Ficha técnica HSL-3

- (11) Zhou, X.H.; Liu, J.P. (2010) Seismic behavior and shear strength of tubed RC short columns. *J. Constr. Steel Res.* 66, 385–397
- (12) SIKA (2016) Hoja de Datos del Producto Sikadur-30, Versión 02.01
- (13) Chang, S.Y.; Chen, T.W.; Tran, N.C.; Liao, W.I. (2014) Seismic retrofitting of RC columns with RC jackets and wing walls with different structural details. *Earthq. Eng. Eng. Vib.* 13, 279–292.
- (14) N. Pasala, S. Dipti, R. Durgesh, (2009) Seismic strengthening of RC columns using external steel cage, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* J. 38 1563–1586
- (15) Meda, A.; Mostosi, S.; Rinaldi, Z.; Riva, P. (2016) Corroded RC columns repair and strengthening with high performance fibre reinforced concrete jacket. *Mater. Struct.* 49, 1967–1978.