

Cutting reinforcement of concrete beams: Evaluation of the viability of jacketed reinforced concrete with steel fibers (SFRC)

Sebastián Etienot¹, Paula Folino¹

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería, Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería “Hilario Fernández Long” (INTECIN, UBA-CONICET), Buenos Aires, Argentina setienot@fi.uba.ar, pfolino@fi.uba.ar

Abstract— A large part of civil works that are carried out involves the repair and/or reinforcement of existing reinforced concrete structures. This work focuses on reinforcing the load-carrying capacity in shear of existing reinforced concrete beams, for which there currently exist various reinforcement technologies. The applicability of a particular type of reinforcement depends, among other factors, on the physical conditions and mechanical properties of the original element, physical space limitations, available technology at the construction site, and costs. Among the new advances in reinforcement methodologies is the use of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) for jacketing or thickening, a material that due to its mechanical properties, durability and constructability is suitable for its use in shear reinforcement. However, its use is not widespread and information regarding its behavior as a reinforcement methodology is scarce. This work compares different shear reinforcement methodologies, in order to evaluate the suitability of SFRC as an alternative to existing methodologies and to identify the aspects in which it is necessary to deepen knowledge in order to ensure its applicability.

Keywords— Fiber Reinforced Concrete, Shear retrofitting of reinforced concrete beams, Concrete jacketing.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Refuerzo a corte de vigas de hormigón: Evaluación de la viabilidad de encamisados con hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC)

Sebastián Etienot¹, Paula Folino¹

¹ Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería, Instituto de Tecnologías y Ciencias de la Ingeniería “Hilario Fernández Long” (INTECIN, UBA-CONICET), Buenos Aires, Argentina
setienot@fi.uba.ar, pfolino@fi.uba.ar

Resumen— Una gran parte de las obras civiles que se realizan, involucra la reparación y/o el refuerzo de estructuras de hormigón armado existentes. En particular, este trabajo se enfoca en el refuerzo de la capacidad portante a corte de vigas existentes de hormigón armado, para lo cual, existen en la actualidad diversas tecnologías de refuerzo. La aplicabilidad de un determinado tipo de refuerzo depende, entre otros factores, de las condiciones físicas y propiedades mecánicas del elemento original, las limitaciones de espacio físico, la tecnología disponible en el lugar de la obra y los costos. Entre los nuevos avances en metodologías de refuerzo, se encuentra el encamisado o recrecido mediante hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC), material que presenta propiedades mecánicas, de durabilidad y de constructibilidad convenientes para su empleo en refuerzos a corte. No obstante, su uso no se encuentra difundido y la información respecto a su comportamiento como metodología de refuerzo es escasa. En este trabajo se comparan distintas metodologías de refuerzo a corte, con el objeto de evaluar la aptitud del SFRC como alternativa a las metodologías existentes y se relevan los aspectos en los que es necesario profundizar el conocimiento, a fin de garantizar su aplicabilidad.

Palabras clave— Hormigón reforzado con fibras, Refuerzo a corte de vigas de hormigón armado, Encamisado de hormigón

Abstract— A large part of civil works that are carried out involves the repair and/or reinforcement of existing reinforced concrete structures. This work focuses on reinforcing the load-carrying capacity in shear of existing reinforced concrete beams, for which there currently exist various reinforcement technologies. The applicability of a particular type of reinforcement depends, among other factors, on the physical conditions and mechanical properties of the original element, physical space limitations, available technology at the construction site, and costs. Among the new advances in reinforcement methodologies is the use of steel fiber-reinforced concrete (SFRC) for jacketing or thickening, a material that due to its mechanical properties, durability and constructability is suitable for its use in shear reinforcement. However, its use is not widespread and information regarding its behavior as a reinforcement methodology is scarce. This work compares different shear reinforcement methodologies, in order to evaluate the suitability of SFRC as an alternative to existing methodologies and to identify the aspects in which it is necessary to deepen knowledge in order to ensure its applicability.

Keywords— Fiber Reinforced Concrete, Shear retrofitting of reinforced concrete beams, Concrete jacketing.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

I. INTRODUCCIÓN

El hormigón armado es el material de construcción más utilizado en el mundo. En muchos casos, resulta necesario el refuerzo de estructuras o de elementos estructurales de este material. Este trabajo se enfoca, en particular, en el caso de refuerzos que es necesario realizar frente a la detección de una deficiencia de la capacidad portante a esfuerzos de corte de vigas de hormigón armado, la cual puede deberse a diversas razones, entre las que se destacan [1-3]:

1) *Nuevos requisitos reglamentarios:* los cambios en las regulaciones de construcción pueden requerir una mayor resistencia y capacidad de carga de las estructuras existentes, lo que puede requerir el refuerzo de las vigas de hormigón a corte para cumplir con los nuevos estándares.

2) *Falla por durabilidad:* la exposición a condiciones ambientales adversas, como la corrosión de las armaduras o la degradación del hormigón, puede reducir la capacidad de carga de las vigas de hormigón. Además, dado que los estribos son los elementos más expuestos, suelen deteriorarse en primer lugar, afectando la capacidad a corte.

3) *Cambios de destino:* la instalación de cargas puntuales o la modificación del uso de un edificio pueden requerir una mayor capacidad de carga de las vigas de hormigón.

4) *Daños a la viga:* se incluyen deterioros como la apertura de pases no previstos para instalaciones, apoyo de elementos estructurales posteriores a la ejecución de la estructura original, y anclajes ejecutados de forma incorrecta, en muchos casos incluyendo la cortadura de estribos.

5) *Acciones excepcionales:* cuando una estructura de hormigón se somete a acciones excepcionales, como sismos, fuego o impacto, las vigas pueden requerir refuerzos por corte.

Con el fin de restituir o aumentar la capacidad a corte de vigas de hormigón, actualmente existen numerosas técnicas de refuerzo, entre las que se destacan como más utilizadas: encamisado de hormigón, hormigón proyectado, mantas o pletinas de polímeros reforzados con fibras, y chapas o perfiles de acero adheridos o anclados [1,3,4]

El material denominado hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC – Steel Fiber Reinforced Concrete), es un desarrollo vigente, que sigue siendo investigado, y del que existe sólo escasa experiencia en su aplicación como metodología de refuerzo, aunque las características en cuanto a su comportamiento mecánico lo hacen conveniente para su

empleo como refuerzo a corte [5,6,7,8]

En este trabajo, se presenta un análisis comparativo que involucra la evaluación de diferentes sistemas de refuerzo a corte para vigas de hormigón armado existentes. Se comparan los sistemas de encamisado de hormigón, hormigón proyectado, polímeros reforzados con fibras (FRP), chapas de acero o perfiles, y SFRC en función de varias variables, incluyendo el espesor del refuerzo, la preparación superficial, la complejidad constructiva, la resistencia a la corrosión, la resistencia al fuego y el costo.

Es importante destacar que este análisis comparativo es cualitativo, ya que los resultados específicos cuantitativos varían dependiendo de factores específicos de cada proyecto, como la magnitud de las solicitaciones, la geometría del elemento y el tipo de ambiente de implantación, entre otras variables.

En resumen, el análisis comparativo que se presenta en este trabajo proporciona una visión general de los diferentes sistemas de refuerzo a corte disponibles y sus características principales, con el objeto de evaluar la viabilidad del refuerzo mediante SFRC como una alternativa adicional, determinando si resulta conveniente avanzar en el estudio de este tipo de refuerzos.

II. ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE REFUERZO A CORTE

Si bien existen múltiples técnicas de refuerzo a corte de vigas de hormigón armado, en este trabajo se analizarán las que se presentan más habitualmente en la bibliografía [1-4], o que son más comunes en la práctica.

A. Encamisado de hormigón armado

El sistema de refuerzo mediante encamisado de hormigón es una técnica que consiste en aplicar una capa adicional de hormigón sobre la superficie lateral y, eventualmente, inferior de la viga, aumentando así la capacidad a corte de la misma.

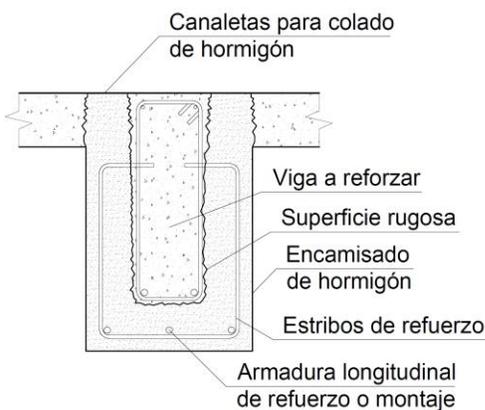


Fig. 1 Refuerzo de viga mediante encamisado de hormigón armado

El proceso comienza con la preparación de la superficie de la viga existente, limpiándola y dándole un acabado rugoso para propiciar una buena adherencia entre la superficie existente y la nueva capa de hormigón. Luego se dispone la armadura,

consistente en estribos, habitualmente anclados al lateral de la viga, y barras longitudinales de montaje o de refuerzo si es que también se está aumentando la capacidad a flexión. A continuación, se instala un encofrado alrededor de la viga y se procede al colado y compactación de la capa de hormigón [2].

Para efectuar el colado, en los casos en que existen losas, lo habitual es practicar aberturas en la misma a los lados de la viga cada una distancia dada, permitiendo la evacuación del aire y el llenado desde distintos puntos [2].

Como alternativa, puede efectuarse el colado desde ventanas en los laterales, aunque reviste mayor dificultad para realizar la tarea y el control de llenado, y requiere completar el tramo superior faltante en una etapa posterior.

El espesor de la capa de encamisado se encuentra condicionado, además del requisito de resistencia, por la armadura requerida y la consistencia del hormigón. Los valores mínimos indicados en la bibliografía varían de 40 a 100 mm [3], aunque lo habitual es que se encuentren por encima de 80mm por razones constructivas.

El encamisado de hormigón es una técnica efectiva y ampliamente difundida para mejorar la resistencia a corte de las vigas de hormigón armado. Sin embargo, la preparación adecuada de la superficie [9], la calidad del hormigón utilizado y el colado del mismo son críticos para asegurar una buena adherencia y durabilidad a largo plazo del refuerzo.

B. Encamisado de hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC – Steel Fiber Reinforced Concrete)

Esta técnica de refuerzo consiste en una variante del método anterior, en la que se emplea SFRC, permitiendo evitar la incorporación de armadura y reduciendo el espesor del encamisado. Además, se obtienen mejoras en la ductilidad, durabilidad y adherencia entre hormigón nuevo y viejo [5,6].

Debido a los menores espesores y el empleo de fibras, resulta conveniente el uso de un hormigón del tipo Autocompactante (SCC – Self-Compacting Concrete) [6,7,10].



Fig. 2 Refuerzo de viga mediante encamisado de SFRC

El procedimiento de ejecución del refuerzo es idéntico al empleado para el hormigón convencional, con la diferencia que el encofrado deberá ser apto para un hormigón autocompactante.

Respecto a la preparación superficial, se ha comprobado que el SFRC presenta una mejor adherencia que el hormigón convencional, alcanzándose buenos resultados aún con un

arenado superficial [8,11].

Al no emplearse armaduras, los espesores se encuentran limitados por la longitud y contenido por volumen de fibras [12], alcanzándose valores mínimos de hasta 30mm [6,13].

El refuerzo mediante SFRC, al igual que el encamisado con hormigón convencional, posee un buen comportamiento frente a la corrosión y a altas temperaturas, pero con la ventaja de que se observa mayor mitigación de la fisuración superficial [14].

Si bien la técnica resulta similar al hormigón convencional, con una relativa sencillez y rapidez constructiva, requiere conocimientos más especializados en la dosificación y elaboración del material, así como una supervisión técnica experimentada para alcanzar los resultados esperados.

C. Hormigón proyectado

El sistema de refuerzo a corte mediante hormigón proyectado consiste en el recrecido de la sección mediante una capa de hormigón proyectada neumáticamente sobre la superficie del elemento existente, permitiendo adaptarse a geometrías complejas.

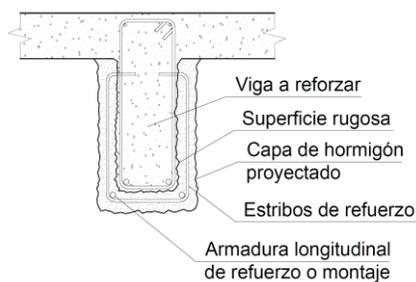


Fig. 3 Refuerzo de viga mediante hormigón proyectado

El proceso implica, en primer lugar, la limpieza y tratamiento de la superficie para obtener un acabado rugoso que garantice buena adherencia entre la superficie existente y la nueva capa de hormigón.

Luego, se deben montar los estribos y barras de montaje o refuerzo en la superficie lateral de la viga existente, vinculada a la misma mediante anclajes [2].

La capa de hormigón proyectado se aplica mediante el uso de una máquina de proyección neumática, que utiliza aire comprimido para transportar y rociar el hormigón sobre la superficie de la viga.

El espesor de la capa de hormigón proyectado puede variar dependiendo de la cantidad de refuerzo requerido, aunque en general se aplica en espesores de hasta 50 mm, recurriendo a capas sucesivas para lograr mayores espesores [2,3].

El procedimiento constructivo es ruidoso y genera gran cantidad de suciedad, haciéndolo poco apto en casos en que los tiempos sean acotados o se requiera limitar las molestias a los ocupantes o linderos.

El acabado obtenido por este método es irregular, requiriendo en general una terminación manual para su acabado final. Asimismo, cabe destacar que la capa de hormigón obtenida resulta más porosa que un hormigón colado y

compactado en encofrado, y la resistencia puede resultar menos uniforme debido a la variación de la relación agua/cemento en los sistemas de proyección por vía seca.

D. Polímeros reforzados con fibras (FRP – Fiber-Reinforced Polymer)

En esta técnica, se aplican una o varias capas de FRP sobre la superficie lateral de la viga, con el objetivo de aumentar la capacidad de corte de la misma.

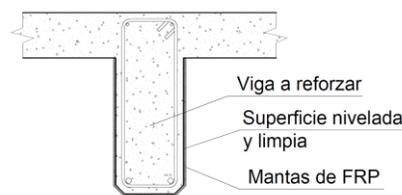


Fig. 4 Refuerzo de viga mediante chapas o perfiles de acero. Alternativas mediante pletinas y mantas

El proceso requiere previamente de la preparación de las caras de la viga existente, obteniendo una superficie limpia y lisa para aplicación del adhesivo epoxi [9].

Las capas de FRP se aplican de forma manual o mediante máquinas especiales, utilizando adhesivos de epoxi para fijar las capas al sustrato. Las capas de FRP pueden ser de vidrio, carbono o aramida, y su número y orientación varían según las necesidades de refuerzo. La cantidad de FRP utilizada depende de la cantidad de refuerzo requerido y de las condiciones de la estructura.

El espesor de la capa de FRP puede variar dependiendo de la cantidad de refuerzo requerido y puede ser de 3 a 4 mm [11,15].

Los materiales FRP son resistentes a la corrosión y no conducen electricidad, lo que los hace adecuados para su uso en entornos corrosivos o en estructuras donde la conducción eléctrica es un problema. No obstante, el epoxi empleado como adhesivo es sensible a la radiación UV, y el escaso espesor y los materiales empleados los hacen susceptibles a la acción del fuego [11,16,17].

Además, la normativa aplicable recomienda limitar la capacidad de los refuerzos debido a un porcentaje determinado de la capacidad total.

E. Chapas o perfiles de acero

En esta técnica, se aplican una o varias chapas o perfiles de acero sobre la superficie lateral de la viga, vinculadas mediante

adhesivos epoxi o mediante anclajes o pernos pasantes.

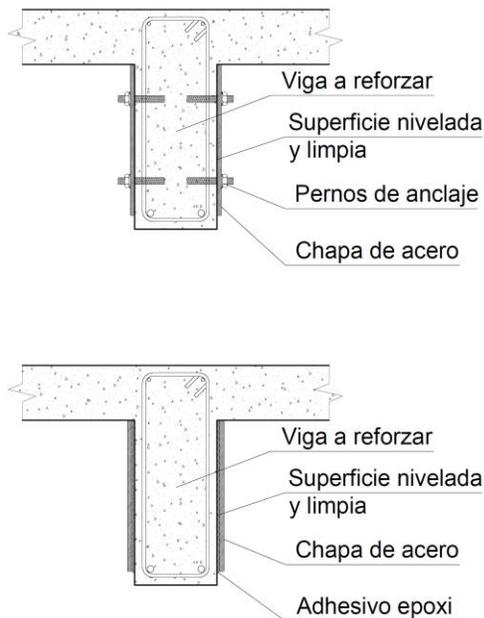


Fig. 5 Refuerzo de viga mediante chapas o perfiles de acero Alternativas mediante anclajes y adhesivo

La preparación superficial requerida en el caso de uso de adhesivos se requiere dar cierta rugosidad a la superficie, mientras que en el caso de anclajes o pernos sólo se requiere nivelación y limpieza [18].

El espesor del refuerzo variable dependiendo si se emplean chapas o perfiles, y en este último caso si los mismos se encuentran dispuestos de forma paralela a las caras de la viga, envolviendo sus aristas o conformando un reticulado. Esta versatilidad permite lograr espesores reducidos, si los mismos resultan un condicionante de diseño, aunque no resulta sencilla su adaptación a geometrías complejas.

Presenta un comportamiento frente al fuego mejor que los refuerzos de FRP, aunque suele necesitar protección adicional para la mayoría de los casos.

Debido a la susceptibilidad del material a la corrosión [11,19], debe aplicarse de una protección adecuada al medio y disponer los medios para el control y mantenimiento de esta durante la vida útil del refuerzo. Esto último resulta, en general, incompatible con los casos en los que debe adoptarse una protección contra el fuego.

III. VARIABLES DE COMPARACIÓN

La conveniencia en la selección de una técnica de refuerzo respecto a otra a la hora de proyectar se encuentra determinada por diversas variables, tanto intrínsecas al propio sistema de refuerzo, como específicas de la estructura a reforzar.

A fin de comparar las técnicas previamente descritas, se analizarán las principales variables cualitativas que condicionan la selección de un refuerzo, y que se describen a continuación.

A. Espesor

El grosor de la capa de refuerzo que se aplica en la viga de hormigón existente dependerá de las características del material de refuerzo, la capacidad portante a corte del elemento estructural original versus la capacidad requerida y la geometría de la viga existente.

El hecho de poder reducir los espesores de los refuerzos y, por lo tanto, las dimensiones finales de un elemento reforzado, resulta de sumo interés desde un punto de vista arquitectónico y puede ser condicionante en algunos casos, como por ejemplo en estructuras de valor patrimonial, accesos de dimensiones reducidas, o zonas con gran cantidad de instalaciones.

En algunos sistemas de refuerzo, como el encamisado de hormigón y el hormigón proyectado, el espesor de la capa de refuerzo puede ser relativamente grande debido a la necesidad de disponer armaduras y proporcionar una cantidad suficiente de material para resistir las solicitaciones de corte. En otros sistemas, como el refuerzo con FRP y las chapas o perfiles de acero, el espesor del refuerzo puede ser menor debido a la alta resistencia y rigidez de estos materiales.

En el caso del refuerzo a corte mediante SFRC, el espesor del refuerzo también puede ser menor debido a posibilidad de prescindir de armaduras y el hecho de que resulta conveniente el empleo de hormigones autocompactantes. Además de que se desarrolla una mejor adherencia que mediante los encamisados de hormigón convencional.

B. Preparación superficial

Esta variable de análisis se refiere al grado de preparación y limpieza que se requiere en la superficie de la viga de hormigón existente antes de la aplicación del sistema de refuerzo.

Dentro de las tareas se incluye el retiro de revestimientos que puedan existir en la zona de aplicación del refuerzo, la conformación superficial mediante arenado, martelinado, o retiro de la capa superficial de hormigón. Asimismo, una vez preparada la superficie, se requiere la limpieza de la superficie eliminando polvo, grasas, aceites, y cualquier resto de material suelto, así como la eliminación de corrosión en barras de acero expuestas, y restitución de recubrimientos en caso de ser necesario.

En algunos sistemas de refuerzo, como el encamisado de hormigón y el hormigón proyectado, la preparación superficial es muy importante y puede requerir la eliminación de la capa superficial del hormigón existente para garantizar una buena adherencia entre la superficie y la nueva capa de refuerzo. En otros sistemas, como el refuerzo con polímeros reforzados con fibra y las chapas o perfiles de acero, la preparación superficial también es importante para garantizar una buena adherencia, pero no se requiere una eliminación profunda de la superficie del hormigón.

En el caso del refuerzo a corte mediante SFRC, la preparación superficial también es importante para garantizar una buena adherencia, pero el grado de preparación puede ser menor que en otros sistemas.

La preparación superficial puede ser un factor crítico en el

éxito de la aplicación del sistema de refuerzo a corte, ya que una mala preparación puede reducir significativamente la adherencia y, en consecuencia, la resistencia del sistema de refuerzo.

En los casos en que se requiere eliminar la capa de hormigón superficial y obtener una superficie rugosa con agregados expuestos, insume un tiempo considerable, suele ser agresiva y, en casos en que las dimensiones del elemento a reforzar son reducidas o el material base es deficiente, puede resultar en una rotura de dicho elemento.

Por lo tanto, debido a que puede resultar determinante para el comportamiento mecánico del refuerzo, existe riesgo de deterioro del elemento original u otros elementos de la edificación, y puede extender considerablemente los tiempos de trabajo, esta variable resulta determinante al seleccionar el sistema de refuerzo adecuado para cada proyecto.

C. Complejidad constructiva

La complejidad constructiva se refiere a la dificultad y de la aplicación del sistema de refuerzo a corte en la viga de hormigón existente. Esta variable puede estar influenciada por factores como la accesibilidad al sitio, la geometría de la viga, la presencia de elementos estructurales adicionales, la necesidad de equipos o herramientas específicos, y necesidad de mano de obra experimentada requerida para la aplicación del sistema de refuerzo.

Algunos sistemas de refuerzo, como el encamisado de hormigón y el hormigón proyectado, pueden requerir una mayor complejidad constructiva debido a la necesidad de aplicar una capa uniforme y continua de material de refuerzo sobre la superficie de la viga de hormigón existente. Esto puede requerir el uso de andamios, equipo de proyección de concreto, encofrados, herramientas para colado y compactación para garantizar una aplicación adecuada y uniforme del material de refuerzo.

En otros sistemas de refuerzo, como el refuerzo mediante FRP y las chapas o perfiles de acero, la complejidad constructiva puede ser menor debido a la facilidad de manipulación y aplicación del material de refuerzo, y la posibilidad de armado de piezas previo al montaje. Esto puede reducir el tiempo y los costos de la aplicación del refuerzo y hacer que el sistema sea más adecuado para proyectos con limitaciones de tiempo o espacio físico.

En el caso del refuerzo a corte mediante SFRC, la metodología constructiva resulta similar al encamisado de hormigón convencional, pero en general, la aplicación de SFRC se considera más fácil y rápida debido a que, en general, no resulta necesario montar armaduras y realizar anclajes, así como también la capacidad de la mezcla de fluir y llenar áreas de difícil acceso.

Es importante considerar la complejidad constructiva al seleccionar el sistema de refuerzo adecuado para cada proyecto, y garantizar que se cuente con la experiencia, habilidad y herramientas necesarias para aplicar el sistema de refuerzo de manera adecuada y efectiva.

D. Resistencia a la corrosión

En el caso de estructuras de hormigón armado, la corrosión es una de las principales causas de deterioro, ya que la exposición a agentes corrosivos, como la humedad y las sales, puede afectar la integridad de las barras de refuerzo y debilitar la estructura.

Los sistemas de refuerzo a corte pueden estar hechos de diferentes materiales, y algunos pueden ser más resistentes a la corrosión que otros. Por ejemplo, el acero es un material propenso a la corrosión, por lo que los sistemas de refuerzo a corte con chapas o perfiles de acero pueden requerir recubrimientos anticorrosivos adicionales para garantizar una vida útil prolongada.

En el caso de la necesidad de aplicación de protección anticorrosiva, se debe tener en cuenta la necesidad de acceso para mantenimiento periódico de la misma, así como su compatibilidad con otras protecciones o acabados necesarios por requisitos arquitectónicos.

En cambio, los sistemas de refuerzo a corte con FRP no son susceptibles a la corrosión y pueden ser más adecuados para estructuras expuestas a ambientes agresivos.

El SFRC presenta un mejor comportamiento frente a la corrosión que el hormigón convencional o el proyectado, gracias a la naturaleza discreta de las fibras, la superficie más homogénea de las mismas debidas al proceso de fabricación, una matriz más densa, y la mejor capacidad de controlar la fisuración. Esto hace que el SFRC resulte adecuado para estructuras expuestas a ambientes agresivos y corrosivos.

En resumen, la resistencia a la corrosión es una variable importante a considerar al seleccionar un sistema de refuerzo a corte, especialmente para estructuras que estarán expuestas a ambientes corrosivos, a fin de garantizar la integridad estructural a largo plazo.

E. Resistencia al fuego

Al elegir un sistema de refuerzo a corte, es importante considerar su resistencia al fuego, ya que mantener la integridad estructural en presencia de altas temperaturas y fuego puede ser crucial para asegurar la seguridad de las personas.

En los sistemas de refuerzo a corte de acero, si bien el material presenta una resistencia moderada al fuego, si la vinculación se encuentra realizada por medio de adhesivos epoxi, la exposición a altas temperaturas puede debilitarla y producir la falla por desprendimiento.

Los sistemas de refuerzo mediante FRP pueden sufrir daños irreversibles a altas temperaturas, por lo que se debe considerar una protección adicional.

En el caso del SFRC, el comportamiento frente a altas temperaturas es bueno, ya que el refuerzo se compone de fibras de acero que pueden resistir altas temperaturas, aunque dependerá de la cantidad y tipo de fibras utilizadas, así como de la densidad y espesor del revestimiento.

Cabe destacar que cuando resulte necesaria la aplicación de una protección adicional, se estará aumentando el espesor del refuerzo y se deberá analizar la compatibilidad entre el material o sistema de protección, material base y necesidad de

terminación superficial.

F. Costo

El costo es condicionante que puede afectar significativamente la viabilidad del proyecto, y puede variar ampliamente entre los diferentes sistemas de refuerzo puede en función de factores como el tipo de material, la cantidad de refuerzo requerida, la complejidad del diseño y la necesidad de mano de obra calificada o equipos específicos.

El encamisado de hormigón es uno de los sistemas más económicos de refuerzo ya que si bien requiere de gran cantidad de mano de obra, encofrados y equipos, el material es tradicional y no reviste complejidad en el diseño y aplicación.

En el caso del SFRC, no se tienen costos definidos por no encontrarse difundida su aplicación. No obstante, el material es más costoso que el hormigón convencional, requiere mano de obra especializada para su elaboración y encofrados más exigentes en el caso habitual de empleo de hormigón autocompactante, por lo que su costo será superior al hormigón convencional.

Los sistemas de refuerzo a corte mediante FRP suelen ser los más costosos, por el costo del material en sí, la necesidad de mano de obra especializada y el costo de diseño del refuerzo.

Sin embargo, el costo del sistema de refuerzo no debe ser el único factor para considerar al seleccionar una opción de refuerzo a corte. Es importante evaluar cuidadosamente las necesidades específicas de la estructura y seleccionar el sistema de refuerzo que proporcione el mejor rendimiento y seguridad a largo plazo, incluso si esto significa un mayor costo inicial. En última instancia, la selección del sistema de refuerzo adecuado debe basarse en una evaluación integral de todas las variables relevantes, incluyendo la resistencia, durabilidad, complejidad constructiva, resistencia a la corrosión, resistencia al fuego y costo.

IV. COMPARATIVA

Para cada uno de los sistemas mencionados, se presenta en la Tabla I el comportamiento en cada una de las variables previamente mencionadas, permitiendo una comparación clara de sus características y ventajas.

Tabla I. Comparación entre sistemas de refuerzo

Sistema de Refuerzo	Encamisado de Hormigón	SFRC	Hormigón Proyectoado	FRP	Chapas o Perfiles de Acero
Espesor mínimo	De 40 a 100 mm	30 mm	50 mm	De 3 a 4 mm	De 5 a 10 mm

Preparación Superficial	Picado de recubrimiento, dejando superficie rugosa. Limpieza superficial.	Arenado o martelinado simple. Limpieza superficial	Picado de recubrimiento, dejando superficie rugosa. Limpieza superficial.	Nivelación y limpieza de caras de hormigón. Puede requerir rugosidad leve.	Nivelación y limpieza de caras de hormigón, en caso de adhesivo. Puede requerir rugosidad leve.
Complejidad Constructiva	Requiere montaje de encofrados y puede ser complicado en áreas con geometrías complejas o elementos que llegan a los laterales de las vigas.	Requiere montaje de encofrados y puede ser complicado en áreas con geometrías complejas o elementos que llegan a los laterales de las vigas	Buena capacidad de adaptación a geometrías complejas. Requiere equipos y mano de obra especializada. Generación de ruido y suciedad.	Fácil de instalar y se adapta bien a geometrías complejas. Requiere mano de obra especializada	Fácil de instalar y relativa facilidad para adaptación a geometrías complejas.
Resistencia a la Corrosión	Moderada	Buena	Baja a Moderada	Buena	Baja
Resistencia al Fuego	Buena	Buena	Buena	Baja	Moderada en el caso de anclajes mecánicos. Baja en el caso de adhesivos.
Costo	Costo bajo	Costo moderado a alto	Costo moderado a alto	Costo alto	Costo moderado

V. CONCLUSIONES

A partir del análisis de las características de las distintas técnicas de refuerzo a corte de vigas de hormigón armado, y de la comparación efectuada entre ellas y la metodología de refuerzo mediante SFRC, se destacan las siguientes características.

- 1) *Espesor reducido:* Debido a la posibilidad de evitar armaduras y el empleo de hormigones de mayor fluidez, combinadas con la buena capacidad del material frente a esfuerzos de corte.
- 2) *Mejora de la ductilidad:* El refuerzo con fibras confiere una mayor ductilidad al elemento, ya que las fibras impiden la propagación rápida de grietas y reducen la tendencia al agrietamiento.
- 3) *Buena adherencia:* El SFRC presenta una mejora de adherencia entre hormigón nuevo y viejo respecto al hormigón convencional, contribuyendo a mejorar la eficiencia del refuerzo.

4) *Requerimientos de preparación superficial*: Dada la buena adherencia del nuevo material, los requisitos de preparación superficial son menores, pudiendo en algunos casos limitarse a un arenado superficial.

5) *Rápida instalación*: La instalación es un proceso más sencillo que en el caso del encamisado de hormigón convencional, gracias a que se evitan armaduras y anclajes de las mismas, y se emplean hormigones más fluidos que resultan más fáciles de colar. Como resultado pueden reducirse significativamente los tiempos y costos de construcción.

6) *Protección contra la corrosión*: Gracias a la capacidad de controlar la fisuración dada por las fibras, presenta un mejor desempeño frente a la corrosión que el hormigón convencional o proyectado, y mucho mayor al refuerzo con chapas o perfiles de acero.

7) *Resistencia al Fuego*: Su comportamiento frente a temperatura es similar al hormigón convencional o proyectado, y mejor que el de refuerzos de acero o FRP.

En general, el encamisado de hormigón reforzado con fibras ofrece una combinación de resistencia y ductilidad que lo convierten en una opción atractiva para el refuerzo a corte de vigas de hormigón. Asimismo, presenta características comparables o mejoras en las mismas respecto a otros sistemas, haciéndolo viable como alternativa de refuerzo.

No obstante, existen aún incógnitas en cuanto a espesores mínimos, rangos de aplicabilidad, incidencia de la preparación superficial y metodología de diseño estructural para determinación del espesor de encamisado, que deberán ser estudiadas en mayor detalle para garantizar su aplicabilidad en la práctica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado para la realización de este trabajo a la Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires (FIUBA) y a la Universidad de Buenos Aires a través del proyecto UBACyT 2020 Nro. 20020190200208BA.

REFERENCIAS

- [1] N. Delatte, 'Failure, distress and repair of concrete structures'. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 335 pp., 2009.
- [2] P. R. L. Helene and F. Pereira, 'Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón reparación, refuerzo y protección', 2003.
- [3] M. F. Cánovas, *Patología y terapéutica del hormigón armado*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones, 1994.
- [4] P. H. Emmons, *Concrete repair and maintenance illustrated: problem analysis; Repair Strategy; Techniques*, vol. 28. John Wiley & Sons, 1992.
- [5] G. Martinola, A. Meda, G. A. Plizzari, and Z. Rinaldi, 'Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete', *Cement and concrete composites*, vol. 32, no. 9, pp. 731–739, 2010.
- [6] G. Ruano, F. Isla, R. I. Pedraza, D. Sfer, and B. Luccioni, 'Shear retrofitting of reinforced concrete beams with steel fiber reinforced concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 54, pp. 646–658, 2014.
- [7] P. Jongvivatsakul, L. V. H. Bui, T. Koyekaewphring, A. Kunawisarut, N. Hemstapat, and B. Stitmannathum, 'Using steel fiber-reinforced concrete precast panels for strengthening in shear of beams: an experimental and analytical investigation', *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, 2019.
- [8] G. Martinola, A. Meda, G. A. Plizzari, and Z. Rinaldi, 'An application of

- high performance fiber reinforced cementitious composites for R/C beams strengthening', in *Proceedings of 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures--FracCoS*, 2007, vol. 6, pp. 1541–1548.
- [9] O. T. Tsioulou, A. P. Lampropoulos, and S. E. Dritsos, 'Experimental investigation of interface behaviour of RC beams strengthened with concrete layers', *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 50–59, 2013.
- [10] C. E. Chalioris and C. N. Pourzitidis, 'Self-compacting concrete jacketing-tests and analysis', *AASRI Procedia*, vol. 3, pp. 624–629, 2012.
- [11] S. Raza, M. K. Khan, S. J. Menegon, H.-H. Tsang, and J. L. Wilson, 'Strengthening and repair of reinforced concrete columns by jacketing: State-of-the-art review,' *Sustainability*, vol. 11, no. 11, p. 3208, 2019.
- [12] P. Folino, M. Ripani, H. Xargay, and N. Rocca, 'Comprehensive analysis of Fiber Reinforced Concrete beams with conventional reinforcement', *Engineering Structures*, vol. 202, p. 109862, 2020.
- [13] A. Gholampour, R. Hassanli, J. E. Mills, T. Vincent, and M. Kunieda, 'Experimental investigation of the performance of concrete columns strengthened with fiber reinforced concrete jacket,' *Construction and Building Materials*, vol. 194, pp. 51–61, 2019.
- [14] H. Xargay, P. Folino, L. Sambataro, and G. Etse, 'Temperature effects on failure behavior of self-compacting high strength plain and fiber reinforced concrete', *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 723–734, 2018.
- [15] M. Naser, R. Hawileh, and J. Abdalla, 'Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review,' *Engineering Structures*, vol. 198, p. 109542, 2019.
- [16] Z. C. Tetta and D. A. Bourmas, 'TRM vs FRP jacketing in shear strengthening of concrete members subjected to high temperatures', *Composites Part B: Engineering*, vol. 106, pp. 190–205, 2016.
- [17] G. Landa Aviles, *Estudio experimental sobre el refuerzo a cortante de estructuras de hormigón mediante materiales compuestos*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.
- [18] B. B. Adhikary and H. Mutsuyoshi, 'Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques', *Construction and building materials*, vol. 20, no. 6, pp. 366–373, 2006.
- [19] X. Liu, Z.-D. Lu, and L.-Z. Li, 'The use of bolted side plates for shear strengthening of RC beams: A review,' *Sustainability*, vol. 10, no. 12, p. 4658, 2018.