

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCION

MAESTRÍA EN INGENIERIA VIAL



**Propuesta de protocolo para la correcta aplicación de fibra de carbono en losas de concreto
en la readecuación de puentes**

Proyecto Final de Graduación para optar por el título de Máster en Ingeniería Vial grado
académico de Maestría

Realizado por:

Benjamin Meneses Monestel

Cartago, Julio de 2018

DEDICATORIA

A mi madre por todo el apoyo brindado todos estos años de estudio y trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Luis Víquez por darme la oportunidad de volver a las aulas después de tantos años.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
INDICE DE GRÁFICOS.....	vii
ABREVIATURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Estado del arte.....	6
2.2. Ventajas de los sistemas CFRP.....	7
2.3. Normativa internacional y nacional relacionada con los sistemas FRP.....	7
2.4. Aplicaciones de materiales compuestos CFRP en puentes de Costa Rica.....	8
2.5. Componentes y propiedades de los sistemas CFRP.....	9
2.6. Sistemas de reforzamiento externo utilizando materiales CFRP.....	12
2.7. Técnicas de aplicación de materiales CFRP.....	14
2.8. Preparación de la superficie para la colocación de la fibra.....	14
3. MARCO METODOLÓGICO.....	16
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS.....	19
4.1. Presentación de comercialización.....	19
4.2. Transporte y envío.....	19
4.3. Almacenamiento.....	19
4.4. Manejo.....	19
4.5. Labores previas a la instalación de sistema CFRP.....	20
4.6. Instalación de sistema CFRP.....	23
4.7. Alineación de los materiales CFRP.....	25
4.8. Múltiples capas y empalmes traslapados.....	25
4.9. Curado de resinas.....	25
4.10. Protección temporal.....	25
4.11. Protección definitiva.....	26
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
7. APÉNDICES.....	29
Apéndice 1. Manual de campo para aplicación de sistemas de reforzamiento estructural con fibra de carbono (CFRP) (Fuente: Mitsubishi Replark).....	30
Apéndice 2. Memoria de cálculo para la determinación del costo por metro cuadrado de reforzamiento de losa con CFRP en colones.....	35
Apéndice 3. Registro fotográfico de intervención Puente Sarapiquí.....	36
Apéndice 4. Listas de verificación para control del proceso.....	45
8. ANEXOS.....	50

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 2.1. Métodos de ensayo para materiales FRP.....	8
Tabla 2.2. Resumen de las características mecánicas de las fibras utilizadas en los sistemas FRP.	9
Tabla 2.3. Especificaciones de una lámina de carbono según fabricantes	10
Tabla 2.4. Especificaciones técnicas de las resinas epóxicas saturantes	11
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas de las resinas adhesivas	12
Tabla 2.6. Especificaciones técnicas de las resinas para sellado de grietas	15

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Ubicación de los 29 puentes recomendados a ser intervenidos (JICA, 2007).....	3
Ilustración 1.2 Ubicación espacial del proyecto en estudio. (Fuente: IGN).....	3

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema del reforzamiento recomendado para el puente sobre el Rio Sarapiquí (JICA, 2007) .	9
Figura 2.2 Curvas esfuerzo - deformación de materiales FRP y acero (Fuente FIB).....	10
Figura 2.3 Instalación de CFRP curado en sitio (Fuente: Jorge Rendón, SYKA).....	13
Figura 2.4 Instalación de platinas de CFRP (Fuente: Jorge Rendón, SYKA).....	13

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Condición de losas de puentes en Costa Rica.	1
Gráfico 2 Condición de estado de la capa de rodamiento	1

ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI	American Concrete Institute
AFRP	Polímeros Reforzados de fibra de Aramida.
ASTM	American Society for Testing and Materials
CSA	Asociación Canadiense de Estándares.
FRP	Fiber Reinforced polymer (Polímeros Reforzados con fibras).
CFRP	Carbon Fiber Reinforced polymer (Polímeros Reforzados con fibras de Carbono).
FHWA	Federal Highway Administration.
FBI	Federation Internationale du Béton.
FRP	Fiber Reinforced Polymer (Polímeros Reforzados con fibra).
GFRP	Polímeros Reforzados de fibra de vidrio.
JCI	Instituto de Concreto de Japón.
JSCE	Sociedad de Ingenieros Civiles de Japón.
NSF	Fundación Nacional de Ciencia.
PAN	Fibras a base de polímeros hechas con poliacrilonitrilo.
PITCCH	Fibras a base de polímeros que se fabrican de petróleo refinado o brea.
PRF	Polímeros Reforzados con Fibras.
RTRI	Instituto de Investigación Técnica Ferroviaria.

RESUMEN

Un inadecuado mantenimiento y el incremento de la capacidad de carga de los vehículos de transporte pesado ha incidido significativamente en el deterioro de muchos de nuestros puentes debido a que las estructuras fueron originalmente concebidas bajo otras premisas. Dada esta condición, se requiere no solo rehabilitar sino también readecuar las estructuras existentes, tomando en cuenta que dicha intervención deberá garantizar el tránsito permanente de vehículos ya que en muchas ocasiones no es posible contar con rutas alternas o desvíos provisionales. En este proyecto, se pretende establecer un protocolo para la correcta aplicación de la fibra de carbono en losas de puentes. Para ello, se selecciona como caso de estudio el puente sobre el río Sarapiquí, en donde está previsto la colocación de dicho refuerzo en la cara superior e inferior de la losa. Para cumplir con este objetivo, se generará un documento que guíe la correcta aplicación del refuerzo de fibras de carbono en la losa de la estructura existente. Se brindarán recomendaciones operativas y de seguimiento durante el proceso de colocación, apoyado en la normativa nacional e internacional vigente, la información del fabricante y las observaciones de campo ya que actualmente se cuenta con poca experiencia en Costa Rica sobre este tema.

Palabras clave: losa de puente, readecuación de estructuras, fibra de carbono, reforzamiento en puentes

ABSTRACT

The lack of a permanent process of maintenance for bridges in Costa Rica, for many years and the increasing of the capacity of transport vehicles have had a significant impact that had damaged some structures which were designed under different assumptions. In some cases, strengthening of the existing structure is required without compromising the overall stability of the same and also at risk, such intervention should ensure continued vehicle traffic, since it is often impossible to have alternate routes or temporary diversions. It is for this reason, that is necessary to establish a protocol for the correct application of carbon fiber bridge deck repair. For this, the bridge over the Sarapiquí River was taken as a reference, where the placement of the reinforcement will run on the top and underside of the slab, and to do a document to guide proper placement of the fiber reinforcement on the existing structure. In addition, operational and monitoring recommendations will be provided during the process, supported by current local and international standards, manufacturer information and field observations, as currently there is few experience in Costa Rica on this topic.

Key words: slab bridge rehabilitation, carbon fiber, bridge strengthening

INTRODUCCIÓN

De las 1 125 estructuras de puentes que hay inventariadas a la fecha en Costa Rica (Ortiz, 2018), la mayoría muestran un deterioro significativo (gráficos 1 y 2). Los daños que se observan en los distintos elementos que conforman los puentes de nuestro país son atribuidos a la degradación por factores ambientales, a la falta de mantenimiento, al envejecimiento, y/o al efecto de eventos naturales tales como sismos y las corrientes de los ríos.



Gráfico 1 Condición de losas de puentes en Costa Rica.

Fuente: Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes, CIVCO, ITCR (2018)

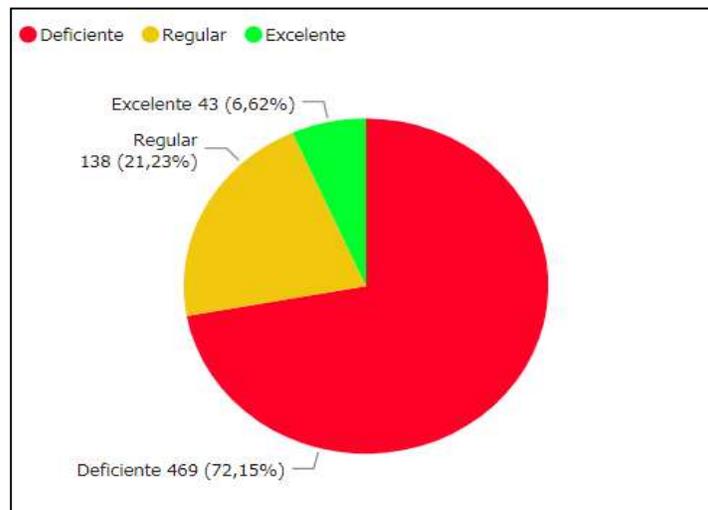


Gráfico 2 Condición de estado de la capa de rodamiento

Fuente: Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes, CIVCO, ITCR (2018)

Este menoscabo aunado a un aumento en el tráfico vehicular; que muchas veces excede las cargas de diseño de los puentes, ha acelerado el deterioro sobre estas estructuras a tal punto que la vida útil de muchos puentes en el país se ha visto reducida de manera significativa. Esta situación justifica la necesidad de buscar soluciones de reforzamiento de fácil y rápida aplicación, que garanticen la integridad estructural.

El uso de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF) o *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) en inglés, constituye una de las tecnologías para el refuerzo estructural de elementos de concreto de puentes y edificios.

Estados Unidos, Japón y Canadá son solamente algunos de los países desarrollados donde son comúnmente utilizados los materiales compuestos como refuerzo externo e incluso como sustitución del acero estructural y como un aditivo en concretos de alta y ultra alta resistencia mediante el uso de microfibras. El material FRP resulta ser una opción competitiva a mediano y largo plazo si se compara con sistemas convencionales de reforzamiento y se toman en consideración las desventajas que estos sistemas convencionales han presentado.

En el caso de Costa Rica, la práctica de utilizar materiales FRP para refuerzo externo de elementos de concreto reforzado no se ha desarrollado lo suficiente. Estos materiales compuestos han sido utilizados para reforzar elementos de concreto en edificaciones, y en muy pocas ocasiones se han utilizado para reforzar losas de concreto en puentes. Existen diferentes razones por las cuales esto sucede, primero, la falta de conocimiento de las propiedades y el comportamiento del material por parte de los profesionales y administradores que tienen a cargo el mantenimiento de este tipo de estructuras; segundo, porque no se tiene claro cuáles son sus ventajas y desventajas y, tercero, porque no se tiene claro el proceso constructivo para la instalación del refuerzo. En resumen, falta de conocimiento y experiencia por parte de los profesionales.

El presente proyecto tiene el objetivo de brindar un protocolo sobre el proceso de instalación de los polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP) con la intención de formar personal técnico capacitado para la aplicación correcta de estos materiales en una futura readecuación de losas de puentes en Costa Rica.

1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes

En el 2007, la Agencia para la Cooperación Internacional de Japón (JICA por sus siglas en inglés), efectuó un estudio en Costa Rica donde analizó veintinueve puentes de diferentes rutas de la Red Vial Nacional, con la finalidad de brindar asistencia técnica en el mantenimiento y/o reforzamiento de este tipo de estructuras.

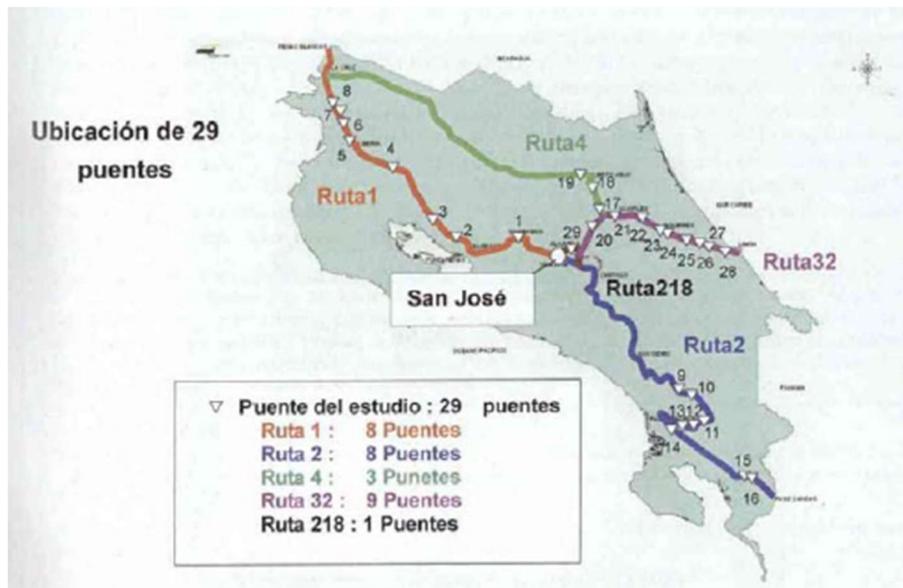


Ilustración 1.1 Ubicación de los 29 puentes recomendados a ser intervenidos (JICA, 2007)

Con base a las recomendaciones indicadas en dicho estudio, en el 2012, el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), somete a proceso de licitación pública el Cartel No. 2012LN-000016-0DI00 para la rehabilitación del puente sobre el río Sarapiquí, donde se solicita el uso de fibra de carbono como refuerzo estructural. En el 2013, Constructora Meco, S.A. resulta adjudicada en firme para la ejecución de dicho contrato. Meco es una empresa de capital 100% costarricense con presencia en Nicaragua, Panamá, El Salvador, Colombia y Costa Rica. Se dedica principalmente a la construcción y mantenimiento de infraestructura vial, aeroportuaria, portuaria, energética, turística y comercial.

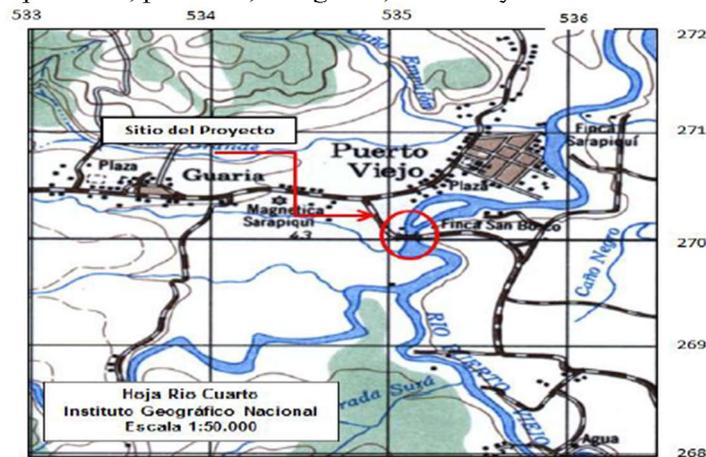


Ilustración 1.2 Ubicación espacial del proyecto en estudio. (Fuente: IGN)

1.2 Planteamiento del problema

El aumento de la capacidad de los vehículos de transporte de carga, así como la necesidad de contar con estructuras más seguras, ha llevado a la ingeniería de puentes a buscar métodos para el reforzamiento de estas estructuras. La readecuación y reforzamiento de puentes en Costa Rica es urgente debido a la falta de mantenimiento y al cambio en las condiciones de usabilidad. La losa de concreto es uno de los elementos en la estructura de un puente donde se observan mayores daños, ya que es ésta la que soporta las cargas que producen las ruedas directamente de los vehículos. Además, en caso de sismo, la losa se ve sometida directamente a momentos y torsiones que también podría dañarla. Las cargas vivas consideradas en los diseños de los años setentas eran bajas, sin embargo, hoy en día son mayores debido al aumento en la capacidad de transporte de peso de los vehículos, la cantidad del tránsito y los nuevos requerimientos sísmicos. Por lo tanto, el refuerzo de la losa de concreto es una necesidad urgente.

La selección del método de refuerzo depende de la capacidad de carga de la losa existente, del grado de deterioro que presente y del material del que están constituidas las vigas (acero o concreto). Así mismo, es importante considerar factores como la interacción entre la superestructura y la subestructura ya que un incremento en el espesor de la losa incide directamente en el peso de la estructura global y puede comprometer la estabilidad de esta o reducir su capacidad. Además, cuando se toma la decisión de incrementar el espesor de una losa de un puente existente, es necesario cerrar el tráfico por completo debido a que la vibración del paso de los vehículos afecta el desarrollo de la resistencia del concreto durante el fraguado. De igual manera sucede con la sustitución o reemplazo total de la losa del puente, que incluso puede resultar más oneroso que realizar un reforzamiento.

Siendo que la mayoría de los puentes en las rutas nacionales de Costa Rica han carecido de mantenimiento preventivo y posiblemente han sufrido deterioro causado por los sismos, condiciones climáticas, corrientes de los ríos e incremento del volumen de tráfico, la deficiencia en el mantenimiento de las carreteras ha provocado que esos daños alcancen niveles cada vez más críticos. El Plan Nacional de Desarrollo establece que la rehabilitación de puentes en las carreteras destinadas para el transporte de camiones es particularmente clave para acelerar el crecimiento de la economía del país.

En el caso del puente sobre el Río Sarapiquí, a la altura de Puerto Viejo, el uso de la fibra de carbono considera que la capacidad de carga viva de la losa existente es HS15, lo que sugiere que un incremento en el espesor de la losa podría comprometer la capacidad del puente. Además, la losa presenta grietas pequeñas en ambas direcciones, que es posible de reparar mediante el uso de epóxicos y fibras. Por último, es imposible suspender el tráfico por un periodo prolongado debido al alto volumen vehicular que transita diariamente por esa estructura y no existe la posibilidad de realizar un desvío provisional o ruta alterna. Por lo tanto, el método de refuerzo de adherencia con fibra de carbono (CFRP: *Carbon Fiber reinforced polymer* por sus siglas en Inglés) resulta ser una de las opciones más adecuadas como solución para incrementar la capacidad de la losa de carga viva a HS20+25% en este puente, y la presente investigación pretende generar un protocolo para asegurar la correcta aplicación de este material.

Es importante considerar que Costa Rica posee características climáticas muy diferentes a los países donde actualmente se está usando el método de refuerzo CFRP, tales como temperatura, humedad relativa, precipitación, etc. por lo que estas variables deberán ser consideradas para efectos del protocolo propuesto.

1.3 Justificación del Estudio

Gran parte del éxito del reforzamiento CFRP radica en contar con mano de obra y personal técnico capacitado en el tema. Constructora Meco, S.A., debe garantizar la calidad del trabajo encomendado por la Administración, y esto conlleva el desarrollar un procedimiento que permita certificar la correcta aplicación de fibra de carbono en el reforzamiento de losas de puentes, en este caso particular, el puente sobre el río Sarapiquí. No solamente por el alto valor de los materiales, sino, por la responsabilidad que se debe asumir. Además, el resultado que este estudio genere podría servir para aplicaciones futuras en condiciones similares, facilitando a los profesionales en el área, una herramienta valiosa y una contribución a la Administración para la rehabilitación de estructuras semejantes en el futuro con fibra de carbono. Incluso los resultados podrán eventualmente aportar a las especificaciones cartelerías de contratos de mantenimiento, construcción y rehabilitación en Costa Rica.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Generar un protocolo para la correcta aplicación de fibra de carbono en la losa de concreto de puentes, como caso específico el puente Sarapiquí, Ruta Nacional #4, Puerto Viejo, Costa Rica.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Establecer un protocolo técnico para la aplicación correcta de la fibra de carbono en la losa del puente Sarapiquí basado en la propuesta de reforzamiento estructural.
- Brindar recomendaciones operativas y de seguimiento del proceso de aplicación de la fibra de carbono en losas de puentes.
- Determinar el costo por metro cuadrado de reforzamiento con fibra de carbono en losas de puentes.

1.5 Alcance y limitaciones

1.5.1 Alcance

El presente estudio se limita a la aplicación de fibra de carbono en losas de puentes de concreto reforzado, para el caso específico del Puente sobre el río Sarapiquí, como puente piloto. No se considera ahondar en el proceso de diseño para el reforzamiento con fibra de carbono o comprobar su efectividad o eficiencia.

1.5.2 Limitaciones

Para la realización del protocolo no se han identificado limitaciones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del arte

La idea de fortalecer las estructuras de concreto con refuerzo externo adherido no es nueva. El desarrollo inicial de métodos de adherencia con fibra de carbono (CFRP por sus siglas en inglés) para la restauración de estructuras de concreto surge desde la década de 1980 en Europa y Japón. La metodología CFRP fue desarrollada como una alternativa a las técnicas de refuerzo externas tradicionales tales como el acero de la placa de unión y el encamisado de acero o concreto a una columna de concreto existente.

El número de proyectos que han usado CFRP se ha incrementado de manera significativa, desde unos pocos proyectos hace 20 años a varios miles en la actualidad (Federación Internacional de Concreto Estructural, 2001). Los elementos estructurales reforzados con métodos CFRP incluyen vigas, losas, columnas, paredes, uniones, conexiones, chimeneas, bóvedas, cúpulas, túneles, silos, tuberías y cerchas. Los métodos CFRP también se han utilizado para reforzar la mampostería, madera, acero y estructuras de hierro fundido.

En el caso específico de Europa, los métodos CFRP se desarrollaron como alternativa sustitutiva de la placa de conexión de acero. Estas placas de unión de acero colocadas en las zonas de tensión de los miembros de concreto y adheridas con resinas demostraron ser técnicas viables para aumentar sus resistencias a la flexión (Fleming & King, 1967). Esta técnica se ha utilizado para fortalecer muchos puentes y edificios en todo el mundo. Sin embargo, las placas de acero se corroen, lo que lleva a un deterioro de la unión entre el acero y el concreto, además de que son difíciles de instalar y se requiere del uso de equipo pesado, por lo que los investigadores han recurrido a materiales de fibra de carbono como una alternativa al acero. Trabajos experimentales utilizando materiales de CFRP para el refuerzo de estructuras de concreto se reportaron desde el 1978 en Alemania (Wolf & Miessler, 1989). Otra investigación en Suiza condujo las primeras aplicaciones de los métodos de CFRP en puentes de concreto armado para el refuerzo a flexión (Meier, 1987); (Rostasy, 1987).

En 1980, Japón fue el primero en aplicar sistemas CFRP en columnas concreto armado para proporcionar confinamiento adicional (Fardis & Khalili, 1981); (Katsumata, Kobatake, & Takeda, 1988). Un repentino aumento en el uso de CFRP se dio en Japón después del terremoto de Hyogoken-Nanbu (mejor conocido como terremoto de Kobe) en 1995 (Nanni, 1995). Los investigadores en Estados Unidos han tenido un largo y continuo interés en el refuerzo a base de fibras para estructuras de concreto desde 1930. Sin embargo, el desarrollo e investigación del uso de estos materiales para la adaptación de las estructuras de concreto, se inició en la década de 1980 a través de las iniciativas de la Fundación Nacional de Ciencia (NSF) y la *Federal Highway Administration* (FHWA). Las actividades de investigación condujeron a la construcción de muchos proyectos de campo que abarcaron una amplia variedad de condiciones ambientales. También, en el ACI 440R se describen algunas investigaciones y aplicaciones de campo para la rehabilitación y fortalecimiento con CFRP, además de conferencias y procedimientos (Neale, FRPs for Structural Rehabilitation: A Survey of Recent Progress, 2000); (Dolan, Rizkalla, & Nanni, 1999); (Saadatmanesh & Ehsani, 1998); (Benmokrane & Rahman); (Neale & Labossiere, State-of-the-art report on retrofitting and strengthening by continuous fibre in Canada., 1997); (Hassan & Rizkalla, 2002); (Shield, Busel, Walkup, & Gremel, 2005).

El desarrollo de códigos y normas para la aplicación de métodos CFRP están en desarrollo en Europa, Japón, Canadá, y los Estados Unidos. En los últimos 10 años, la Sociedad de Ingenieros Civiles de Japón (JSCE),

el Instituto de Concreto de Japón (JCI), y el Instituto de Investigación Técnica Ferroviaria (RTRI) han publicado varios documentos relacionados con el uso de CFRP en estructuras de concreto. En Europa, el comité 9.3 de la Federación Internacional del Concreto Estructural (FIB) publicó un boletín sobre los lineamientos del diseño con refuerzo de CFRP para estructuras de concreto armado (International Federation for Structural Concrete, 2001). La Asociación Canadiense de Estándares (CSA), ha participado activamente en el desarrollo de la normativa para los métodos CFRP y en el 2006 se completó la Sección 16, "Estructuras reforzadas con fibra de carbono," para el Código de Diseño de Carreteras y Puentes Canadiense (CSA, 2006). En los Estados Unidos, los criterios para la evaluación de los métodos CFRP están a disposición de la industria de la construcción (Chapman, 1997); Hawkins et al. 1998). En Costa Rica, se ha utilizado fibra de carbón en los siguientes casos durante los últimos diez años:

- Reforzamiento de vigas de bodegas del Ministerio de Agricultura y Ganadería en Sabana.
- Reforzamiento de vigas de puente de intercambio en Escazú.
- Reforzamiento de muros de carga y columnas en condominio en Jacó.
- Reforzamiento de vigas y columnas en edificio anexo del poder Judicial.
- Reforzamiento de vigas en tienda en Alajuela.
- Reforzamiento de vigas para TFG de estudiantes de grado de la Universidad de Costa Rica.

2.2. Ventajas de los sistemas CFRP

El sistema de reforzamiento estructural con materiales compuestos (CFRP) tiene ventajas importantes, a saber:

- a. Gran resistencia a la tensión: Aproximadamente 7 u 8 veces más que el acero grado 60 y 10 veces mayor que el acero grado 40.
- b. Bajo peso: Aproximadamente 40 veces más liviano que el acero, lo cual influye en la facilidad y tiempo final de instalación.
- c. No se corroe: El CFRP es un material sintético, por lo cual no se corroe, incluso se puede aplicar en estructuras ubicadas en zonas costeras. (Hoja Técnica *SikaWrap* 300C, 2012)
- d. Se puede aplicar en espacios confinados.
- e. Resistencia alta a la tensión axial.
- f. La rigidez se puede adaptar a las necesidades del proyecto.
- g. Presentaciones en tamaño y cantidad también se pueden adaptar a las necesidades de la obra.
- h. Facilidad de aplicación, comparado con otros sistemas convencionales.

Sin embargo, el uso de estos materiales también presenta desventajas tales como:

- a. Comportamiento lineal hasta la falla, sin deformaciones plásticas, lo que reduce la ductilidad de los elementos.
- b. Costo elevado por peso de material CFRP en comparación con el acero u otras alternativas.
- c. Coeficientes de expansión térmica incompatibles con el concreto.
- d. Degradación y posterior colapso prematuro de las fibras al ser sujetas a temperaturas elevadas producto del fuego y a los rayos ultravioleta.
- e. Los materiales son propensos a sufrir daños por impacto, vandalismo y/o accidentes debido a que son un refuerzo externo.
- f. Técnicas de diseño empíricas poco desarrolladas y variabilidad de las propiedades de los materiales.

2.3. Normativa internacional y nacional relacionada con los sistemas FRP

A nivel mundial existen varios entes internacionales que se han dedicado a fijar las normas referentes al uso de materiales compuestos FRP, tanto en Europa, Japón y en Norteamérica principalmente.

A nivel de América, las normas más reconocidas son la “ACI 440.2R-08: *Guide for the Design and Constructions of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*” del Instituto Americano del Concreto y la ASTM D7565-09 “*Determining tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composites used for strengthening of civil structures*” de la American Standard for Testing and Materials”.

A continuación, se detalla los principales ensayos que actualmente se le aplican a las láminas y elementos compuestos por fibra de carbono:

Tabla 2.1. Métodos de ensayo para materiales FRP

Propiedad	Método de ensayo	
	ASTM	ACI 440.3R
Dureza superficial	D2538	—
	D2240	—
	D3418	—
Coefficiente de expansión térmico	D696	—
Temperatura de transición del vidrio	D4065	—
Fracción de volumen	D3171	—
	D2584	—
Adherencia lámina - concreto (tensión directa " <i>pull-off</i> ")	D4551	L.1
Módulo de tensión	D3039	L.2
Resistencia al cortante	D3165	L.3

Fuente: ACI 440.2R (2008)

En Costa Rica, a la fecha no se cuenta con normativa técnica sobre la utilización de los sistemas compuestos de fibra para la readecuación de losas de concreto de puentes o elementos estructurales en general del sector de la construcción, por lo que actualmente se utilizan las normas supra citadas.

2.4. Aplicaciones de materiales compuestos CFRP en puentes de Costa Rica

El Gobierno de Costa Rica solicitó al Gobierno de Japón asistencia técnica para el establecimiento de un sistema de administración de puentes. En respuesta a esta solicitud se decidió conducir un estudio, para el cual se utilizó una muestra de 29 puentes a lo largo de carreteras nacionales esenciales por donde transitan camiones pesados, enfocado en la asistencia para el desarrollo de capacidad para el reforzamiento, rehabilitación y administración de puentes. El informe final de dicho estudio se presentó en Febrero del 2007 y es aquí donde se describe el proceso seguido de selección y priorización de 10 puentes para su rehabilitación y reforzamiento. Como parte del mismo estudio, se realizó el diseño del reforzamiento de los puentes seleccionados y se logró constatar que en 5 de los 10 puentes seleccionados se recomienda utilizar materiales CFRP para reforzamiento externo de elementos de concreto tales como la losa de concreto o las vigas principales. Los puentes a los cuales se recomienda el uso de materiales FRP como refuerzo externo son: Puente sobre el Río Puerto Nuevo – Ruta 2 (refuerzo de la losa), Puente sobre el Río Nuevo – Ruta 2 (Refuerzo de las vigas principales), Puente sobre el Río Chirripó - Ruta 32, Puente sobre el Río Torres - Ruta 218 (refuerzo de las vigas principales) y Puente sobre el Río Sarapiquí – Ruta 4 (refuerzo de la losa, Figura 2.1), éste último es el objeto del presente proyecto final de graduación.

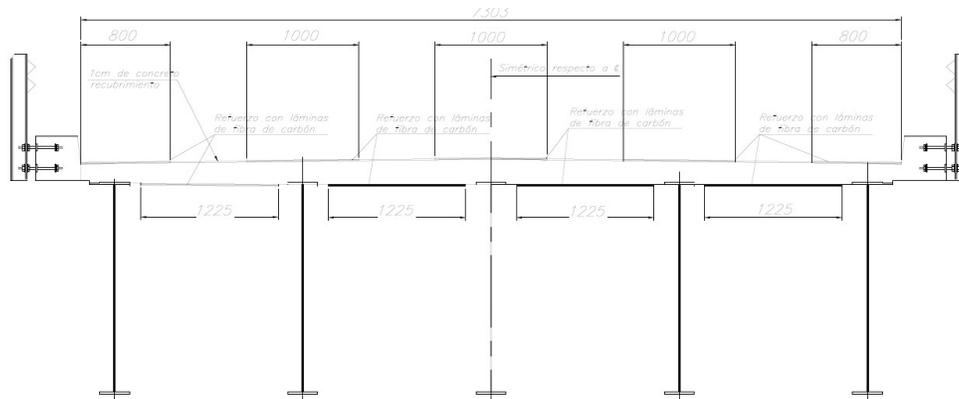


Figura 2.1. Esquema del reforzamiento recomendado para el puente sobre el Rio Sarapiquí (JICA, 2007)

2.5. Componentes y propiedades de los sistemas CFRP

Los polímeros reforzados con fibras (CFRP) se constituyen de un material compuesto el cual consiste de fibras, una matriz y adhesivos.

2.5.1. Las fibras

Las fibras son las responsables de brindarle las propiedades estructurales al material compuesto debido a que su rigidez y resistencia es mucho mayor que la de la matriz. Las fibras empleadas propiamente como refuerzo, consisten en fibras pequeñas, continuas en una dirección, bidireccional o incluso sin dirección.

En el mercado existen tres tipos de fibra predominantemente utilizadas con polímeros: la fibra de vidrio (GFRP), la fibra de aramida (AFRP) y la más comúnmente usada fibra de carbono (CFRP).

Tabla 2.2. Resumen de las características mecánicas de las fibras utilizadas en los sistemas FRP.

Material	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación última a la tensión (%)
Carbono			
Alta resistencia	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Ultra alta resistencia	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Alto módulo	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Ultra alto módulo	500-700	2100-2400	0,2-0,4
Vidrio			
E	70	1900-3000	3,0-4,5
S	85-90	3500-4800	4,5-5,5
Aramida			
Bajo módulo	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Alto módulo	115-130	3500-4000	2,5-3,5

Fuente : Fédération Internationale du Béton (FIB)

Las fibras de vidrio (GFRP) tienen como principal ventaja su bajo costo sin embargo son menos resistentes que otros tipos de fibras. Existen tres tipos de fibra de vidrio: tipo E, S y AR. Estas fibras se diferencian entre sí en su resistencia al álcali y en su resistencia mecánica.

Las fibras de aramida (AFRP) tienen como ventaja su buen comportamiento ante cargas cíclicas y su alta dureza. Poseen una estructura anisotrópica (mayor resistencia y módulo de elasticidad en el sentido

longitudinal), presentan una respuesta elástica lineal cuando se les carga en tensión y presentan un comportamiento no lineal cuando trabajan en compresión. La fibra marca Kevlar es la fibra aramida más reconocida.

Las fibras de carbono (CFRP) son las más conocidas y utilizadas debido a que presenta mejores propiedades mecánicas en comparación con los otros tipos de fibra (Ver Tabla 2.2). Estas son fabricadas con polímeros tipo PITCH o PAN. Las fibras a base de polímeros PITCH se fabrican de petróleo refinado o brea, ofrecen materiales de uso general y poseen una alta resistencia y un alto módulo de elasticidad. Las fibras PAN están hechas con poliacrilonitrilo y producen un material de alta resistencia y alto módulo de elasticidad.

Para poder comprender con mayor facilidad las diferencias en resistencia que se obtiene de los polímeros reforzados con fibras, la Figura 2.2 compara las curvas esfuerzo-deformación de materiales FRP fabricados con los tres tipos de fibras previamente expuestas y la curva típica del acero estructural. Es evidente la gran resistencia que ofrece los materiales FRP a base de fibras de carbono (CRFP) en comparación con materiales a base de fibras de aramida o de vidrio y el mismo acero estructural.

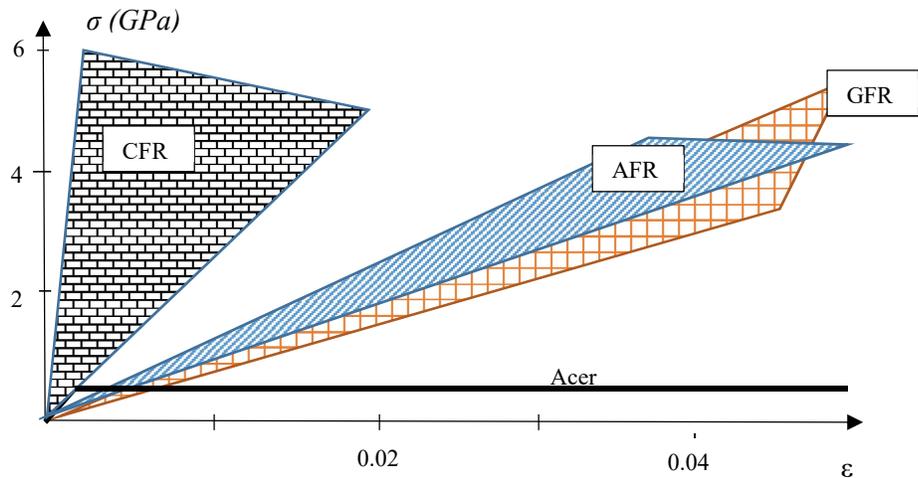


Figura 2.2. Curvas esfuerzo - deformación de materiales FRP y acero (Fuente FIB)

En el mercado existen diferentes formas o modalidades de fibras de carbono, dependiendo del uso o aplicación que se le pretenda dar, para el caso de refuerzo de estructuras de concreto, en la Tabla 2.3 se muestran las especificaciones técnicas principales de los principales fabricantes, para una lámina de fibra sin epóxicos, según ASTM D7565-09.

Tabla 2.3. Especificaciones de una lámina de carbono según fabricantes

Fabricante	Modelo	Módulo tensión ($E_{cf} * t_{cf}$) (kN/mm)	Módulo elasticidad (E_{cf}) (kN/mm ²)	Espesor (t_f) (mm)	Resistencia última a tensión (f^*_{fu}) (kN/mm ²)
FyFE	Tyfo SCH-41	103,520	281	0,368	2.300,000
BASF	MBrace CF160	74,910	227	0,330	3.800,000
FOREVA	700SC	115,200	240	0,480	No indicado
Mitsubishi	REPLARK	91,520	640	0,143	1.900,000

Fabricante	Modelo	Módulo tensión ($E_{cf} * t_{cf}$) (kN/mm)	Módulo elasticidad (E_{cf}) (kN/mm ²)	Espesor (t_f) (mm)	Resistencia última a tensión (f^*_{fu}) (kN/mm ²)
SYKA	600C	80,880	240	0,337	4.300,000
Simpson	CSS-UCF20	75,900	230	0,330	4.800,000
Olympus	Tex 640 BI	96,640	640	0,151	2.511,000

Fuente: Fichas técnicas de cada fabricante (continuación).

2.5.2. La Matriz

La matriz de un material compuesto se encarga de proteger las fibras contra la abrasión y la corrosión ambiental, mantiene las fibras unidas y distribuye la carga entre ellas. Esta puede ser del tipo termoendurecible (tipo más común) o termoplástico. Los materiales termoendurecibles son materiales originalmente suaves que al recibir calor se convierten en sólidos insolubles; una acción que no es reversible.

Por el otro lado, los materiales termoplásticos se comportan como un líquido cuando se les transfiere calor. La matriz utilizada influye grandemente en muchas de las propiedades mecánicas del material tales como su módulo y resistencia transversal y sus propiedades de cortante y compresión.

Los tipos de matrices más comunes son las resinas epóxicas (ver Tabla 2.4), el poliéster y el viniléster. Estos polímeros son del tipo termoendurecible, de gran resistencia química y fácil de procesar. Las resinas epóxicas tienen mejores propiedades mecánicas que los poliésteres y vinilésteres y una durabilidad excepcional.

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas de las resinas epóxicas saturantes

Características	Resina epóxica saturante	Norma ASTM
Viscosidad	Componente A: 11000-13000 cps a 25°C	
	Componente B: 11 cps a 25°C	
Viscosidad de producto mezclado	600-700 cps	
Densidad (a 20°C)	Componente A: 1,16 kg/l	ASTM D-972
	Componente B: 0,95 kg/l	
	Producto mixto: 9,17 kg/l	
Tg	82°C	ASTM D-4065
Resistencia a la tracción	72,4 MPa	ASTM D-638 Tipo 1
Módulo de tracción	3,18 GPa	ASTM D-638 tipo 1
Porcentaje de elongación	5,00%	ASTM D-638 Tipo 1
Resistencia a la compresión	86,2 MPa	ASTM D-695
Módulo de compresión	3,2 GPa	ASTM D-695
Resistencia a flexión	123,4 MPa	ASTM D-790
Módulo de flexión	3,12 GPa	ASTM D-790

Fuente: Grupo de Estudio JICA et al, 2007

2.5.3. Los Adhesivos (resinas)

Los adhesivos son los materiales utilizados para adherir el material FRP a la superficie de concreto, con el fin de que se dé una adecuada transferencia de carga por cortante entre el elemento de concreto y el sistema FRP y así trabajen como una sección compuesta. Generalmente, se componen de una mezcla de resina epóxica (polímero) con un endurecedor, Las características de los adhesivos se pueden variar para adaptarse a las necesidades del trabajo a realizar.

Tabla 2.5. 1. Especificaciones técnicas de las resinas adhesivas

Características	Resina epóxica adhesiva	Norma ASTM
Viscosidad	Componente A: 7000-1000 cps a 25°C	
	Componente B: 11 cps a 25°C	
Viscosidad producto mezclado	Consistencia de pasta gruesa	
Densidad (a 20°C)		ASTM D-972
Tg	82°C	ASTM D-4065
Resistencia a la tracción	72,4 MPa	ASTM D-638 Tipo 1
Módulo de tracción	3,18 GPa	ASTM D-638 Tipo 1
Porcentaje de elongación	5,00%	ASTM D-638 Tipo 1
Resistencia a la compresión		ASTM D-695
Módulo de compresión		ASTM D-695
Resistencia a flexión	123,4 MPa	ASTM D-790
Módulo de flexión	3,12 GPa	ASTM D-790

Fuente: Grupo de Estudio JICA et al, 2007

2.6. Sistemas de reforzamiento externo utilizando materiales CFRP

Existen dos sistemas para el reforzamiento externo de elementos de concreto: los sistemas de curado en sitio y los sistemas de elementos prefabricados (o precurados).

2.6.1. Sistemas de curado en sitio

Estos sistemas también conocidos como sistemas de colocación húmeda (*wet layup*), puede disponer de las fibras ya sea en una o en varias direcciones, cubriendo parcialmente o totalmente el elemento (Ver Figura 2.3). La superficie de concreto debe tratarse previamente para promover la adherencia. Su instalación se puede realizar de dos maneras:

- La fibra se aplica directamente sobre la resina la cual ha sido previamente aplicada sobre la superficie del concreto.
- La fibra es impregnada con la resina en una máquina saturadora y luego aplicada húmeda a la superficie del concreto.



Figura 2.3. Instalación de CFRP curado en sitio (Fuente: Jorge Rendón, SYKA)

2.6.2. Elementos pre-curados

Los elementos prefabricados pueden ser cintas o láminas rectas o también elementos con formas predefinidas tales como cascaras, chalecos o angulares los cuales se instalan con adhesivos (Ver Figura 2.4), Estos elementos se encuentran listos para ser instalados en obra por medio de adhesivos fríos.



Figura 2.4. Instalación de platinas de CFRP (Fuente: Jorge Rendón, SYKA)

2.7. Técnicas de aplicación de materiales CFRP

Existen dos técnicas para la aplicación de materiales FRP a elementos de concreto: la técnica básica y la técnica especial.

La técnica básica consiste en la aplicación manual de los sistemas de curado en sitio y elementos prefabricados, vistos en el apartado anterior.

La técnica especial consiste en la aplicación de los sistemas de reforzamiento antes expuestos según métodos especializados, en muchos casos patentados, que se explican a continuación:

- a. Envolver automáticamente los elementos de concreto con fibras húmedas de CFRP mediante un robot especializado, lo cual permite garantizar la calidad del proceso así como una rápida aplicación.
- b. Adherir el material CFRP a la superficie en un estado pre-esforzado.
- c. Adherir cintas de CFRP con pines de carga mediante un proceso de fusión entre capas de CFRP que permite el movimiento relativo de las fibras.
- d. Colocar el CFRP mediante curado rápido en sitio empleando dispositivos de calentamiento (infrarrojo, calentadores eléctricos, entre otros) para disminuir el tiempo de curado.
- e. Adherir elementos preformados tales como angulares o cascaras de material CFRP.
- f. Realizar rendijas en el concreto para colocar tiras de material CFRP.
- g. Impregnar el material CFRP a la superficie de concreto mediante el uso de bolsas de vacío.

En el caso específico de este proyecto final de graduación, se aplicará únicamente la técnica básica, ya que es necesario iniciar de lo elemental. Quedará para un proyecto a posteriori ahondar en la técnica especial.

2.8. Preparación de la superficie para la colocación de la fibra

Previo al tratamiento de fisuras y agrietamientos detectados en los elementos de concreto, se debe realizar una limpieza superficial cuidadosa de los costados de las fisuras a fin de eliminar polvo, grasa o residuos de curadores que puedan impedir la correcta adherencia de la resina epóxica superficial.

Para garantizar la correcta limpieza para la aplicación de la resina epóxica superficial, se debe utilizar cobertores de plástico y otros, para evitar la contaminación.

Se colocan las boquillas o puertos de inyección con un extremo adecuado para el acoplamiento de inyectores. Las boquillas se pegan sobre la superficie de concreto a la distancia que indique el fabricante, garantizando la penetración de la resina a todo lo largo de la fisura. En los casos donde existan bifurcaciones (ramificaciones), la colocación se realiza en la fisura principal y en las secciones secundarias.

Se debe evitar cualquier perforación o ranura sobre las fisuras a fin de evitar polvos y detritos que colmaten las grietas e impidan la penetración de resina.

Después de colocada la resina, se aplica el sellado temporal, en el exterior de la fisura, sobre su plano, con una resina epóxica de alta adherencia, de consistencia pastosa que cumpla con las especificaciones de la norma ASTM C881-90, Tipo I, IV, Grado 3, Clase B+C.

Tabla 2.6. Especificaciones técnicas de las resinas para sellado de grietas

Características	Resina epóxica (inyección)	Plaste epóxica (sello)
Densidad	1,05 kg/l a 23°C	1,6 kg/l aprox.
Consistencia	Muy fluida, similar al agua	Pastosa
Proporción de mezcla (A:B), en peso	2:1	3:1
Proporción de mezcla (A:B), en volumen	1,71:1	-
Vida útil para 500g a 23°C	70-120 minutos	40-65 minutos
Resistencia a la compresión	Mayor a 500 kg/cm ²	650 kg/cm ²
Adherencia en plano inclinado	-	70 kg/cm ² a 2 días 105 kg/cm ² a 14 días

Fuente: Sika, Colombia (2012)

Posterior a la aplicación del calafateo y después de adquirida la resistencia esperada, se procede a la inyección de la resina epóxica de alta fluidez con una máquina especial con capacidad de dosificar la resina y su catalizador, así como variar la presión de inyección según lo requiera la tipología de cada fisura.

2.8.1. Inyección de grietas

Las grietas en el concreto dañan la durabilidad y la capacidad de carga de los elementos de concreto estructural reforzados con acero, así como su capacidad de servicio. En el reforzamiento de elementos estructurales por medio de sistemas FRP cobran alta importancia en cuanto a la disminución de la capacidad de carga cuando las estructuras presentan niveles altos de agrietamiento, razón por la cual se cubren en este apartado la importancia de realizar esta actividad previo al proceso de reforzamiento.

Las grietas generalmente se reparan por tres diferentes propósitos, los cuales se describen brevemente: (IMCYC, 2000)

- Sellado: Impedir el paso de agentes corrosivos y humedad que puedan dañar los elementos estructurales.
- Adherencia ligera: Ligar los dos bordes de la fisura con un material de elasticidad limitada
- Adherencia resistente: Realizar la unión de los bordes de la fisura para que resista la tensión para restablecer la capacidad de carga del elemento estructural.

En virtud del propósito con el que se realiza el sellado y relleno de las fisuras es que se realiza la selección del material a utilizar en el sellado, el otro factor que se considera en la selección del tipo de material de inyección corresponde al grado de humedad que se encuentra el elemento estructural.

2.8.2. Resinas Epóxicas.

Resinas compuestas de dos componentes, muestran buenas propiedades mecánicas, sus propiedades físicas y químicas varían mucho, en función de esto será la capacidad de carga que puedan resistir, la cual varía entre 100 – 25.000 MPa. Por lo general las resinas epóxicas no pueden ser utilizados en elementos sometidos a alta humedad, o se usan de manera muy limitada, por su desventaja de tener mala adherencia. Generalmente las resinas epóxicas son las indicadas a utilizar cuando se requiere rigidizar de la mejor manera las fisuras.

Las resinas epóxicas por lo general se recomienda utilizarse cuando se requiere alcanzar alguna de las siguientes propiedades: (IMCYC, 2000)

- resistencia al desprendimiento (10-20 N/mm²)
- resistencia a la tensión (20-40 N/mm²)
- resistencia a la compresión (> 100 N/mm²)
- resistencia a la tensión por flexión (hasta 30 N/mm²)

3. MARCO METODOLÓGICO

Se realizó una investigación documental sobre la aplicación de fibra de carbono, sus métodos y beneficios para luego ser aplicada en el reforzamiento de la losa de concreto del Puente sobre el Río Sarapiquí como plan piloto según el siguiente diagrama del proceso de investigación:

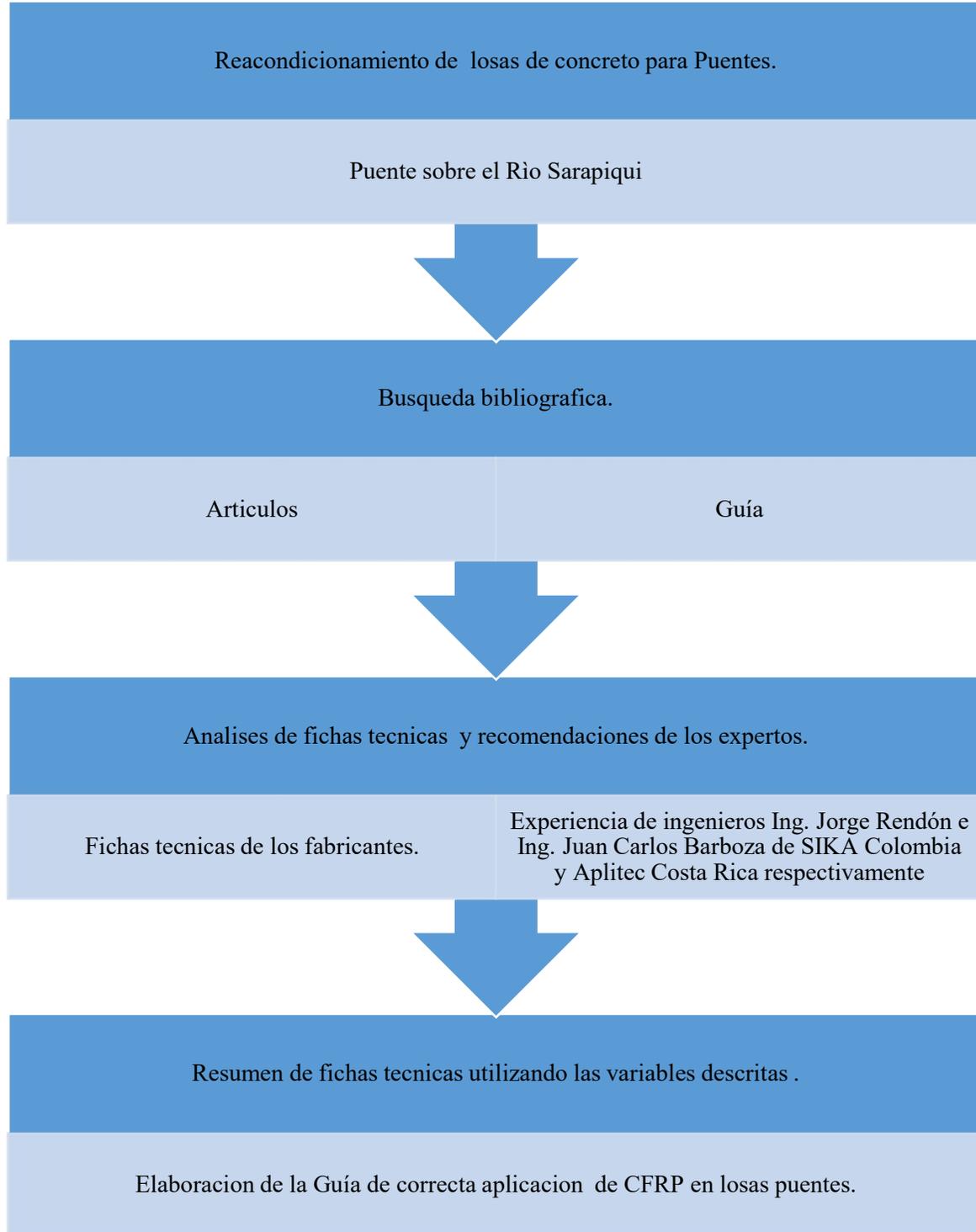


Diagrama 1. Proceso de investigación

Utilizando la técnica de investigación aplicada, se buscó, estudió y analizó diferentes recomendaciones y protocolos establecidos para la aplicación de CFRP mediante la revisión bibliográfica de documentos. Se emplearon las bases de datos Google académico, página oficial del Fabricante SIKA en el repositorio de hojas técnicas, página Oficial del MOPT en el Repositorio Digital. Igualmente se realizó exploración manual de la bibliografía referenciada en otros artículos relacionados con el tema. Se emplearon como términos de búsqueda: “Polímero de Fibras de Carbono” o “CFRP” y “Refuerzo Estructural” o “Reacondicionamiento de estructuras” y sus respectivos en idioma inglés. Además, se recopiló recomendaciones orales de expertos Ing. Jorge Rendón e Ing. Juan Carlos Barboza de SIKA Colombia y Aplitec Costa Rica respectivamente, de proveedores y protocolos de aplicación de países donde se tienen mayor experiencia y utilización de estas técnicas como Japón, Canadá y Colombia.

Al tratarse de un método constructivo relativamente novedoso y de importación en Costa Rica, se requirió definir muchas variables para lograr su objetivo de manera exitosa, tales como:

1. Conocer en que presentaciones se comercializa los sistemas CFRP.
2. Transporte y sus restricciones.
3. Almacenamiento seguro.
4. Requisitos de seguridad ocupacional durante su colocación para el personal.
5. Capacitación técnica de la mano de obra.
6. Rendimiento de aplicación del personal e identificación de factores que pueden afectarlo.
7. Costos de compra de materiales, fletes e impuestos de internación al país.
8. Requisitos para generar un sustrato competente sobre el que se aplicará el CFRP.
9. Condiciones ambientales requeridas para la instalación y operación.
10. Tiempos de curado recomendados durante y antes de poner en funcionamiento la estructura.
11. Traslapos mínimos recomendados, tanto longitudinal como transversalmente.
12. Acabados finales para mejorar su desempeño y protegerlo de posibles daños.

Con toda la información recopilada se realizó la elaboración de una Guía para la correcta aplicación de la fibra de carbono en las losas de concreto de puentes.

Para la determinación del precio por metro cuadrado de colocación del sistema CFRP, se requería medir directamente en campo el rendimiento con el fin de conocer y determinar los costos necesarios para la ejecución de dicha actividad, siempre lo recomendado será efectuarlo por medio de métodos como el Crew balance, Five minutes rating o Work sampling. Debido a la poca experiencia que se tiene en Costa Rica, y que el proyecto no ha iniciado, se entrevistó a los Ing. Jorge Rendón e Ing. Juan Carlos Barboza, de SIKA Colombia y Aplitec Costa Rica respectivamente, los cuales colaboraron ampliamente con los costos de los materiales, mano de obra, equipos y rendimientos requeridos. Se determinó un rendimiento de 30 metros cuadrados por día.

El equipo requerido es:

- a. Una máquina de soldar.
- b. Una planta eléctrica.
- c. Equipo de herramienta menor (esmeriladora, cepillos de acero, saturador, tijeras, rodillos, espátulas, etc.).

El personal requerido es:

- a. Un soldador.
- b. Dos operarios calificados.
- c. Ocho peones.

Materiales requeridos es:

- a. Imprimante.
- b. Mortero epóxico.
- c. Resina de impregnación primera capa.
- d. Mortero de reparación.
- e. Resina de impregnación segunda capa.
- f. Fibra de Carbono.
- g. Pintura de Uretano acrílico.
- h. Material de Hierro negro para guindolas.
- i. Material para limpieza de herramientas.

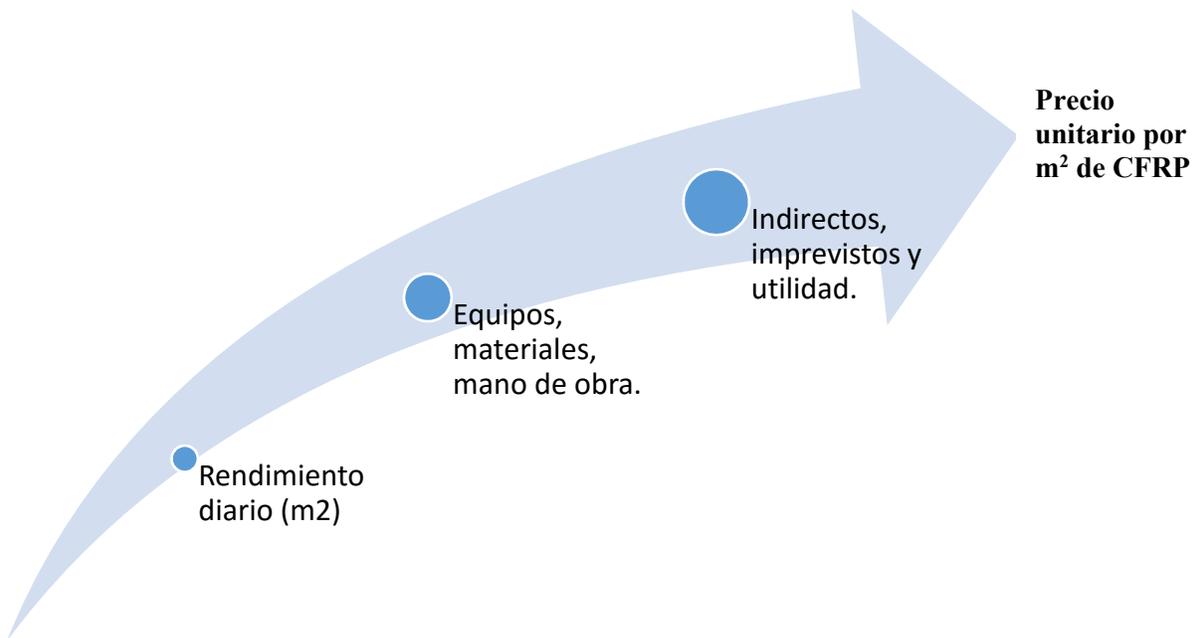


Diagrama 2. Proceso de determinación del precio por m² de CFRP.

En el Apéndice 2 puede encontrar la memoria de cálculo donde se desglosa el precio unitario obtenido para el caso específico de la losa del Puente sobre el Río Sarapiquí.

Es importante acotar que cada proyecto tiene sus particularidades, por lo que el costo unitario por metro cuadrado de CFRP en losas de puentes puede verse afectado por las condiciones propias de cada estructura, tales como grado de deterioro, reparación del sustrato, remoción de capas asfálticas, accesibilidad para el personal, requisitos de diseño, etc.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

A continuación, se detallan los requisitos de construcción recomendados para la aplicación correcta de los sistemas CFRP en obras de reforzamiento estructural en general:

4.1. Presentación de comercialización

Los sistemas CFRP se comercializan en dos formas principalmente, rollos de tela de diferentes anchos y longitudes dependiendo de las necesidades de diseño, además, pueden presentarse con tejidos unidireccionales, bidireccionales o sin dirección definida y bandas precuradas de diferentes anchos y longitudes. Las resinas se venden en latas herméticas en componentes A y B en diferentes tamaños.

4.2. Transporte y envío

Los materiales que componen los sistemas CFRP deben empacarse y enviarse de manera que se ajusten a todos los códigos y normas de la legislación nacional aplicables.

Muchos de estos materiales se clasifican como corrosivos, inflamables o venenosos.

4.3. Almacenamiento

4.3.1. Condiciones de almacenamiento: para preservar las propiedades y mantener la seguridad en el almacenamiento de los materiales constituyentes del sistema CFRP, los materiales deben almacenarse de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Ciertos materiales, tales como agentes de curado reactivos, endurecedores, iniciadores, catalizadores y solventes de limpieza, tienen requisitos relacionados con la seguridad y deben almacenarse de la manera recomendada por el fabricante y OSHA. Los catalizadores e iniciadores (generalmente peróxidos) deben almacenarse por separado.

4.3.2. Vida útil: las propiedades de los componentes de resina sin curar pueden cambiar con el tiempo, la temperatura o la humedad. Tales condiciones pueden afectar la reactividad del sistema mixto y las propiedades no curadas y curadas. El fabricante establece una vida útil recomendada dentro de la cual las propiedades de los materiales basados en resina pueden seguir cumpliendo o superando los criterios de rendimiento establecidos. No debe usarse ningún material componente que haya excedido su vida útil, se haya deteriorado o se haya contaminado. Los materiales de CFRP que se consideren inutilizables deben desecharse de la manera especificada por el fabricante y aceptables para las reglamentaciones de control ambiental.

4.4. Manejo

4.4.1. Hoja de datos de seguridad del material: Las hojas de datos de seguridad del material (MSDS) para todos los materiales y componentes constituyentes de CFRP deben obtenerse de los fabricantes y deben estar accesibles en el sitio de trabajo.

4.4.2. Fuentes de información: Se puede encontrar información detallada sobre el manejo y los peligros potenciales de los materiales constituyentes de CFRP en informes de ACI e ICRI, literatura y guías de la compañía, directrices de OSHA y otros documentos informativos del gobierno. ACI 503R se señala específicamente como una guía general para la manipulación segura de epóxicos y otros compuestos adhesivos de resina.

4.4.3. Peligros de manipulación general: Las resinas termoendurecibles describen una familia genérica de productos que incluye poliésteres insaturados, ésteres de vinilo, epóxicos y resinas de poliuretano. Los materiales utilizados con ellos generalmente se describen como endurecedores, agentes de curado,

iniciadores de peróxido, isocianatos, rellenos y flexibilizadores. Hay precauciones que deben observarse al manipular resinas termoendurecibles y sus materiales componentes. Algunos riesgos generales que pueden encontrarse cuando se manejan resinas termoendurecibles se enumeran como:

- Irritación de la piel, como quemaduras, erupciones cutáneas y picazón.
- Sensibilización de la piel, que es una reacción alérgica similar a la causada por la hiedra venenosa, u otros alérgenos.
- Respirar vapores orgánicos de solventes de limpieza, monómeros y diluyentes.
- Con una concentración suficiente en el aire, explosión o incendio de materiales inflamables cuando se expone al calor, llamas, luces piloto, chispas, electricidad estática, cigarrillos u otras fuentes de ignición.
- Reacciones exotérmicas de mezclas de materiales que causan incendios o lesiones personales.
- Polvo molesto causado por la molienda o manejo de los materiales CFRP curados (la literatura del fabricante debe ser consultada para riesgos específicos).

La complejidad de las resinas termoendurecibles y los materiales asociados hace que sea esencial que las etiquetas y la MSDS sean leídas y entendidas por quienes trabajan con estos productos.

4.4.4. Manipulación y equipo de protección personal: Los trajes y guantes desechables son adecuados para manipular materiales de fibra y resina. Se recomiendan guantes desechables de goma o plástico y deben desecharse después de cada uso. Los guantes deben ser resistentes a resinas y solventes. Gafas de seguridad se deben usar cuando se manejan componentes de resina y solventes. Se debe usar protección respiratoria, como máscaras contra el polvo o respiradores, cuando haya partículas de fibra, polvo o vapores orgánicos, o durante la mezcla y colocación de resinas si el fabricante del sistema de CFRP lo requiere.

4.4.5. Manipulación segura en el lugar de trabajo: El lugar de trabajo debe estar bien ventilado. Las superficies deben cubrirse según sea necesario para proteger contra la contaminación y los derrames de resina. Cada material constitutivo del sistema CFRP tiene diferentes requisitos de manipulación y almacenamiento para evitar daños. El fabricante del material debe ser consultado para orientación. Algunos sistemas de resina son potencialmente peligrosos durante la mezcla de los componentes. Se debe consultar la literatura del fabricante para conocer los procedimientos de mezcla adecuados, y la MSDS para conocer los peligros específicos de manejo. Las mezclas de resina de curado producen calor, lo que a su vez acelera la reacción. Las reacciones no controladas, que incluyen el humo, el fuego o la ebullición violenta, pueden ocurrir en recipientes que contienen una masa mixta de resina; por lo tanto, los contenedores deben ser monitoreados.

4.4.6. Limpieza y eliminación: La limpieza puede involucrar el uso de solventes inflamables, y se deben observar las precauciones apropiadas. Los solventes de limpieza están disponibles que no presentan los mismos problemas de inflamabilidad. Todos los materiales de desecho deben ser contenidos y eliminados según lo prescrito por la autoridad ambiental prevaleciente.

4.5. Labores previas a la instalación de sistema CFRP

Los fabricantes han desarrollado procedimientos para instalar sistemas CFRP y a menudo difieren entre sí. Además, los procedimientos de instalación pueden variar dentro de un sistema, dependiendo del tipo y condición de la estructura.

Este apartado presenta pautas generales para la instalación de sistemas CFRP. Únicamente el personal técnico capacitado por el fabricante, de acuerdo con los procedimientos de instalación desarrollados, deben instalar sistemas CFRP. Las desviaciones de los procedimientos desarrollados por el fabricante no deberían permitirse sin consultar previamente al fabricante

4.5.1. Mano de obra calificada:

El contratista de instalación del sistema CFRP debe demostrar competencia para la preparación de la superficie y la aplicación del sistema CFRP que se instalará. La competencia del contratista puede demostrarse al proporcionar evidencia de capacitación y documentación del trabajo relacionado previamente completado por el contratista o por la preparación de la superficie real y la instalación del sistema CFRP en partes de la estructura. El fabricante del sistema CFRP o su agente autorizado debe capacitar al personal de la aplicación del contratista en los procedimientos de instalación de su sistema y asegurarse de que sean competentes para instalar el sistema.

4.5.2. Consideraciones de temperatura y humedad:

La temperatura, humedad relativa y humedad superficial en el momento de instalación puede afectar el rendimiento del CFRP. Las condiciones que deben observarse antes y durante la instalación incluyen la temperatura de la superficie del concreto, la temperatura del aire, la humedad relativa y el punto de rocío correspondiente. En general, los imprimadores, las resinas saturantes y los adhesivos no deben aplicarse a superficies frías o congeladas. Cuando la temperatura de la superficie del concreto cae por debajo de un nivel mínimo especificado por el fabricante del sistema, puede ocurrir una saturación incorrecta de las fibras y un curado inadecuado de los materiales constituyentes de la resina, comprometiendo la integridad del CFRP. Se puede usar una fuente de calor auxiliar para elevar la temperatura ambiente y la superficie durante la instalación. La fuente de calor debe estar limpia y no contaminar la superficie o el sistema CFRP no curado. Por lo general, las resinas y los adhesivos no deben aplicarse sobre superficies mojadas o húmedas a menos que hayan sido formulados para tales aplicaciones. Los sistemas de CFRP no deben aplicarse a superficies de concreto sujetas a transmisión de vapor de humedad. La transmisión de vapor de humedad desde una superficie de concreto a través de los materiales de resina sin curar suele aparecer como burbujas superficiales y puede comprometer la unión entre el sistema CFRP y el sustrato.

4.5.3. Equipo:

Algunos sistemas CFRP tienen un equipo único diseñado específicamente para la aplicación de los materiales para un sistema en particular. Este equipo puede incluir impregnadores de resina, pulverizadores, dispositivos de elevación / posicionamiento y máquinas de bobinado. Todo el equipo debe estar limpio y en buenas condiciones de funcionamiento. El contratista debe tener personal capacitado en la operación de todos los equipos. El equipo de protección personal, como guantes, máscaras, protectores oculares y overoles, debe elegirse y usarse para cada función del empleado. Todos los suministros y equipos deben estar disponibles en cantidades suficientes para permitir la continuidad en el proyecto de instalación y garantía de calidad.

4.5.4. Reparación de sustratos y preparación de la superficie:

El comportamiento de los miembros de concreto reforzado o retroadaptado con sistemas CFRP depende en gran medida de un sustrato de concreto sano y una preparación y perfilado de la superficie de hormigón. Una superficie preparada incorrectamente puede dar como resultado el despegamiento o delaminación del sistema CFRP antes de lograr la transferencia de carga de diseño. Las pautas generales presentadas en este capítulo deberían ser aplicables a todos los sistemas CFRP unidos externamente. Las pautas específicas para un sistema particular de CFRP deben obtenerse del fabricante. La preparación del sustrato puede generar ruido y polvo.

4.5.4.1. Reparación del sustrato:

Todos los problemas asociados con la condición del concreto original y el sustrato de concreto que pueden comprometer la integridad del sistema CFRP deben abordarse antes de que comience la preparación de la superficie. El ACI 546R e ICRI 03730 detallan los métodos para la reparación y preparación de la superficie del concreto. Todas las reparaciones de concreto deben cumplir con los requisitos de los planos de diseño y las especificaciones del proyecto. El fabricante del sistema CFRP debe ser consultado sobre la compatibilidad con los materiales utilizados para reparar el sustrato.

4.5.4.1.1. Deterioro relacionado con la corrosión:

Los sistemas CFRP unidos externamente no deben aplicarse a los sustratos de concreto sospechoso de contener acero de refuerzo corroído. Las fuerzas expansivas asociadas con el proceso de corrosión son difíciles de determinar y podrían comprometer la integridad estructural del sistema aplicado externamente. Debe abordarse la(s) causa(s) de la corrosión, y el deterioro relacionado con la corrosión debe repararse antes de la aplicación de cualquier sistema unido externamente.

4.5.4.1.2. Inyección de grietas:

Las grietas de 0.25 mm y más anchas puede afectar el rendimiento del sistema CFRP unido externamente por deslaminación o trituración de fibra. En consecuencia, las grietas de más de 0.25 mm deben inyectarse a presión con epóxico antes de la instalación del sistema CFRP de acuerdo con ACI 224.1R. Las grietas más pequeñas expuestas a entornos agresivos pueden requerir inyección o sellado de resina para evitar la corrosión del refuerzo de acero existente. Los criterios de ancho de grieta para varias condiciones de exposición se dan en ACI 224.1R.

4.5.4.2. Preparación de la superficie:

Los requisitos de preparación de la superficie deben basarse en el objetivo aplicación del sistema CFRP. Las aplicaciones se pueden categorizar como críticas de enlace o críticas de contacto. Las aplicaciones de adherencia crítica, como el refuerzo a flexión o cizallamiento de vigas, losas, columnas o paredes, requieren una unión adhesiva entre el sistema CFRP y el concreto. Las aplicaciones críticas para el contacto, como el confinamiento de columnas, solo requieren un contacto íntimo entre el sistema FRP y el concreto. Las aplicaciones de contacto crítico no requieren una unión adhesiva entre el sistema FRP y el sustrato de concreto, aunque a menudo se proporciona una para facilitar la instalación.

4.5.4.2.1. Aplicaciones de adherencia crítica:

La preparación de la superficie para aplicaciones de adherencia crítica debe estar de acuerdo con las recomendaciones de ACI 546R e ICRI 03730. Las superficies de concreto reparadas a las que se aplicará el sistema CFRP deben estar recién expuestas y sin materiales sueltos o poco sólidos. Cuando las fibras se envuelven alrededor de las esquinas de las secciones transversales rectangulares, las esquinas deben redondearse a un radio mínimo de 13 mm para evitar las concentraciones de tensión entre el sistema CFRP y el concreto. Las esquinas rugosas deben alisarse con masilla. Las obstrucciones, las esquinas interiores, las superficies cóncavas y los objetos incrustados pueden afectar el rendimiento del sistema CFRP y deben abordarse. Las obstrucciones y los objetos incrustados deben ser eliminados antes de instalar el sistema CFRP. Las esquinas interiores y las superficies cóncavas pueden requerir detalles especiales para garantizar que se mantenga la unión del sistema CFRP con el sustrato. La preparación de la superficie se puede lograr utilizando técnicas abrasivas o de chorro de agua. Deben eliminarse todas las lechadas, el polvo, la suciedad, el aceite, el compuesto de curado, los revestimientos existentes y cualquier otra materia que pueda interferir con la unión del sistema de CFRP con el concreto. Los agujeros de fallas y otros huecos superficiales pequeños deben estar completamente expuestos durante el perfilado de la superficie. Una vez completadas las operaciones de perfilado, la superficie debe limpiarse y protegerse antes de la instalación de CFRP para que ningún material que pueda interferir con la adherencia se vuelva a depositar en la superficie. La superficie de concreto debe prepararse con un perfil de superficie de concreto mínimo (SSP3). El fabricante del sistema CFRP debe ser consultado para determinar si es necesario un perfil de superficie más agresivo. Las variaciones localizadas fuera del plano, incluidas las líneas de forma, no deben exceder 1 mm o las tolerancias recomendadas por el fabricante del sistema CFRP. Las variaciones localizadas fuera del plano pueden eliminarse mediante molienda, antes de la abrasión o chorro de agua, o puede alisar con masilla a base de resina si las variaciones son muy pequeñas. Los huecos deben llenarse con masilla a base de resina. Todas las superficies para recibir el sistema de fortalecimiento deben estar tan secas como lo recomienda el fabricante del sistema. El agua en los poros puede inhibir la penetración de resina y reducir el enclavamiento mecánico. El contenido de humedad debe evaluarse de acuerdo con los requisitos de ACI 503.4.

4.5.4.2. Aplicaciones de contacto crítico:

En las aplicaciones que involucran el confinamiento de miembros estructurales de concreto, la preparación de la superficie debe promover el contacto íntimo continuo entre la superficie del concreto y el sistema CFRP. Las superficies por envolver deben, como mínimo, ser planas o convexas para promover la carga adecuada del sistema CFRP. Los grandes vacíos en la superficie deben repararse con un material de reparación compatible con el concreto existente. Los materiales con baja resistencia a la compresión y módulo elástico, como el yeso, pueden reducir la efectividad del sistema CFRP y deben eliminarse.

4.5.5. Sistemas embebidos en la superficie:

Los sistemas embebidos en la superficie generalmente se instalan en ranuras cortadas en la superficie del concreto. El refuerzo de acero existente no debe dañarse al cortar la ranura. Se debe verificar la solidez de la superficie de concreto antes de instalar la barra. Las caras interiores de la ranura deben limpiarse para asegurar una unión adecuada con el concreto. El surco resultante debe estar libre de lechada u otros compuestos que puedan interferir con el enlace. El contenido de humedad del concreto original debe controlarse para adaptarse a las propiedades de adhesión del adhesivo. Los surcos deben estar completamente llenos con el adhesivo. El adhesivo debe ser especificado por el fabricante del sistema.

4.5.6. Mezcla de resinas:

La mezcla de resinas debe realizarse de acuerdo con el procedimiento recomendado por el fabricante. Todos los componentes de resina deben estar a la temperatura adecuada y mezclarse en la proporción correcta hasta que haya una mezcla uniforme y completa de los componentes. Los componentes de resina a menudo son colores contrastantes, por lo que se logra una mezcla completa cuando se eliminan las rayas de color. Las resinas se deben mezclar durante el tiempo de mezclado prescrito y se deben inspeccionar visualmente para determinar la uniformidad del color. El fabricante del material debe suministrar los tamaños de lote recomendados, las proporciones de mezcla, los métodos de mezcla y los tiempos de mezclado. Los equipos de mezclado pueden incluir pequeñas palas mezcladoras alimentadas eléctricamente o unidades especiales, o las resinas pueden mezclarse con agitación manual, si es necesario. La mezcla de la resina debe ser lo suficientemente pequeña para garantizar que toda la resina mezclada se pueda utilizar dentro de la vida útil de la misma. La resina mezclada que exceda su vida útil no debe usarse porque la viscosidad continuará aumentando y afectará adversamente la capacidad de la resina para penetrar en la superficie o saturar la lámina de fibra.

4.6. Instalación de sistema CFRP

Los vapores pueden acompañar la aplicación de algunas resinas. Los sistemas CFRP deben seleccionarse teniendo en cuenta su impacto en el medioambiente, incluida la emisión de compuestos orgánicos volátiles y toxicología.

4.6.1. Imprimación y enmasillado:

Cuando sea necesario, la imprimación se debe aplicar a todas las áreas de la superficie de hormigón donde se instalará el sistema CFRP. La imprimación debe colocarse uniformemente en la superficie preparada a la tasa de cobertura especificada por el fabricante. La imprimación aplicada debe estar protegida del polvo, la humedad y otros contaminantes antes de aplicar el sistema CFRP. La masilla debe usarse en un espesor y secuencia apropiados con la imprimación según lo recomendado por el fabricante. La masilla compatible con el sistema, que normalmente es una pasta espesada a base de resina, debe usarse solo para rellenar vacíos y suavizar las discontinuidades superficiales antes de la aplicación de otros materiales. Los bordes ásperos o las paletas de la masilla curada deben alisarse antes de continuar con la instalación. Antes de aplicar la resina saturante o el adhesivo, la imprimación y la masilla deben dejarse curar según lo especificado por el fabricante del sistema CFRP. Si la masilla y el empaste están completamente curados, es posible que se requiera una preparación adicional de la superficie antes de aplicar la resina o el adhesivo de saturación. Los requisitos de preparación de la superficie deben obtenerse del fabricante del sistema.

4.6.2. Sistemas de colocación en húmedo:

Los sistemas CFRP de colocación en húmedo generalmente se instalan a mano con láminas de fibra seca y una resina de saturación, normalmente de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. La resina de saturación se debe aplicar uniformemente a todas las superficies preparadas donde se va a colocar el sistema. Las fibras también se pueden impregnar en un proceso separado utilizando una máquina de impregnación de resina antes de colocarlas en la superficie del concreto. Las fibras de refuerzo se deben presionar suavemente en la resina de saturación no curada de la manera recomendada por el fabricante. El aire atrapado entre las capas debe liberarse o extenderse antes de que se fije la resina. Se debe aplicar suficiente resina de saturación para lograr la saturación total de las fibras. Deben colocarse capas sucesivas de resina saturada y materiales de fibra antes del curado completo de la capa previa de resina. Si las capas anteriores se curan, es posible que se requiera la preparación de la superficie de la capa intermedia, como lijado ligero o aplicación de solventes recomendada por el fabricante del sistema.

4.6.3. Sistemas aplicados a máquina:

Los sistemas aplicados a máquina pueden usar arrastres preimpregnados de fibra seca mediante carruchas. Las fibras se impregnan con la resina de saturación fuera del sitio y se envían al sitio de colocación como carretes de material de arrastre. Las fibras secas se impregnan en el sitio de trabajo durante el proceso de bobinado. Las máquinas de embalaje se utilizan principalmente para la envoltura automática de columnas de hormigón. Los arrastres se pueden enrollar horizontalmente o en un ángulo específico. La máquina de envolver se coloca alrededor de la columna y envuelve automáticamente el material de estopa alrededor del perímetro de la columna mientras se mueve hacia arriba y hacia abajo de la columna. Después de envolver, los sistemas preimpregnados deben curarse a una temperatura elevada. Por lo general, una fuente de calor se coloca alrededor de la columna para un horario y una temperatura predeterminados de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Las temperaturas están controladas para garantizar una calidad constante. Las envolturas de CFRP resultantes no tienen costuras ni soldaduras porque los remolques son continuos. En todos los pasos de aplicación anteriores, se deben seguir las recomendaciones del fabricante del sistema CFRP.

4.6.4. Sistemas precurados:

Los sistemas precurados incluyen conchas, tiras y formas de cuadrículas abiertas que normalmente se instalan con un adhesivo. Los adhesivos se deben aplicar uniformemente a las superficies preparadas donde se colocarán los sistemas precurados, excepto en ciertos casos de confinamiento de concreto donde la adherencia del sistema CFRP al sustrato de concreto puede no ser necesaria. Las superficies laminadas templadas que se unirán deben estar limpias y preparadas de acuerdo con la recomendación del fabricante. Las hojas precuradas o las carcasas curvas deben colocarse sobre o dentro del adhesivo húmedo de la manera recomendada por el fabricante de CFRP. El aire atrapado entre las capas debe liberarse o desplegarse antes de que se fije el adhesivo. El adhesivo se debe aplicar a una velocidad recomendada por el fabricante a un perfil mínimo de superficie de concreto SSP3 para asegurar la unión completa de las capas sucesivas (ICRI 03732).

4.6.5. Sistemas NSM:

Los sistemas NSM consisten en instalar barras de CFRP rectangulares o circulares en surcos cortados en la superficie del hormigón y unidos en su lugar con un adhesivo. Las ranuras deben estar dimensionadas para asegurar un adhesivo adecuado alrededor de las barras. Los sistemas NSM se pueden usar en la parte superior de los miembros estructurales y para aplicaciones aéreas. Existen muchos métodos de aplicación y tipos de adhesivos que se han utilizado con éxito en el campo para sistemas NSM. El fabricante del sistema de NSM debe especificar el tipo de adhesivo y el método de instalación.

4.6.6. Recubrimientos de protección:

Los recubrimientos deben ser compatibles con el sistema de fortalecimiento de CFRP y aplicarse de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Por lo general, no se recomienda el uso de solventes para limpiar la superficie de CFRP antes de instalar los recubrimientos debido a los efectos nocivos que los solventes pueden tener sobre las resinas de polímero. El fabricante debe aprobar cualquier uso de la preparación de la limpieza con solvente de las superficies CFRP antes de la aplicación de recubrimientos protectores. Los revestimientos se deben inspeccionar periódicamente y se debe proporcionar mantenimiento para garantizar la efectividad de estos.

4.7. Alineación de los materiales CFRP

Debe especificarse la orientación de las capas de CFRP y la secuencia de apilamiento de capas. Pequeñas variaciones en el ángulo, tan pequeñas como 5 grados, desde la dirección prevista de alineación de la fibra pueden causar una reducción sustancial en la resistencia y el módulo. Las desviaciones en la orientación de las capas solo deben hacerse si son aprobadas por el profesional de diseño. Los materiales de las telas se deben manipular de manera que se mantenga la rectitud y la orientación de la fibra. Los pliegues de tela, pliegues u otras formas de ondulación severa deben informarse al profesional de diseño encargado.

4.8. Múltiples capas y empalmes traslapados

Se pueden usar múltiples capas, siempre que todas las capas estén completamente impregnadas con el sistema de resina, la resistencia al corte de resina es suficiente para transferir la carga de corte entre las capas, y la resistencia de la unión entre el concreto y el sistema CFRP es suficiente. Para tramos largos, se pueden usar múltiples longitudes de material de fibra o material precurado para transferir continuamente la carga proporcionando los empalmes de solape adecuados. Los empalmes traslapados deben escalonarse, a menos que el profesional de diseño indique lo contrario. Los detalles de empalme de vuelta, incluida la longitud de vuelta, deben basarse en pruebas e instalarse de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. Debido a las características únicas de algunos sistemas CFRP, no siempre son posibles múltiples capas y empalmes por solapamiento.

4.9. Curado de resinas

La fijación de resinas es un fenómeno dependiente del tiempo y la temperatura. Las resinas de curado ambiental pueden tardar varios días en alcanzar el curado completo. Las temperaturas extremas o fluctuaciones pueden retardar o acelerar el tiempo de curado de la resina. El fabricante del sistema puede ofrecer varios grados de resina precalificados para adaptarse a estas situaciones. Los sistemas de curado elevados requieren que la resina se caliente a una temperatura específica durante un período de tiempo específico. Varias combinaciones de tiempo y temperatura dentro de una envolvente definida deberían proporcionar una cura completa del sistema. Todas las resinas se deben curar de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. No se debe permitir la modificación de campo de la química de la resina. La cura de las capas instaladas debe ser monitoreada antes de colocar capas subsiguientes. La instalación de capas sucesivas debe detenerse si existe una anomalía de curado.

4.10. Protección temporal

Temperaturas adversas; el contacto directo por la lluvia, el polvo o suciedad; la excesiva luz solar; la alta humedad; o el vandalismo puede dañar un sistema CFRP durante la instalación y causar una cura inadecuada de las resinas. Es posible que se requiera protección temporal, como carpas y pantallas de plástico, durante la instalación y hasta que las resinas se hayan curado. Si se requiere apuntalamiento temporal, el sistema CFRP debe estar completamente curado antes de quitar el apuntalamiento y permitir que el miembro estructural transporte las cargas de diseño. En caso de sospecha de daño al sistema CFRP durante la instalación, el diseñador debe ser notificado y el fabricante del sistema CFRP consultado.

4.11. Protección definitiva

Debido a que los sistemas CFRP tienen baja resistencia a altas temperaturas, se requiere la colocación de una membrana de impermeabilización en la zona superior de la losa, para evitar que la mezcla asfáltica a colocarse sobre la losa del puente pueda afectar su comportamiento y/o dañarlo.

En el Apéndice 1 “Guía de campo para la aplicación de fibra de carbono” se detalla el resultado de la investigación que consiste en una guía práctica, accesible, y de fácil comprensión para garantizar un proceso constructivo correcto de los sistemas CFRP aplicados a losas de concreto de puentes vehiculares.

En el Apéndice 2, se muestra la memoria de cálculo para la determinación del costo por metro cuadrado de reforzamiento de losa de concreto con fibra de carbono.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El reforzamiento estructural de losas de concreto de puentes mediante la utilización de los sistemas CFRP, en particular la losa del puente Sarapiquí, requiere que el personal técnico, llámese ingenieros, inspectores, maestros de obra, operarios y peones, cuente con el conocimiento básico de almacenamiento, preparación, manipulación y aplicación correcta de los materiales para alcanzar el objetivo de manera exitosa.

La formación técnica de personal de campo capacitado en este tipo de tecnologías, nuevas en nuestro entorno, es responsabilidad de los ingenieros, quienes son los llamados a instruirse en primera instancia, por lo tanto, este protocolo pretende constituirse en una herramienta práctica de consulta.

El costo por metro cuadrado de reforzamiento con el sistema CFRP es bastante elevado (¢362,743.36), por tanto, su correcta instalación cobra aún más trascendencia, ya que, su efectividad depende en gran parte de ello. No obstante, al tratarse de este puente en específico sobre el río Sarapiquí, el cual no tiene redundancia (rutas alternas) para ningún tipo de vehículo, la única alternativa sería construir uno nuevo contiguo, y si se considera que el precio por metro lineal de puente ronda los cien mil dólares, la inversión requerida es de al menos diez millones de dólares (\$10.000.000,00) por lo que aún así, sigue siendo viable y rentable el uso de la fibra de carbono que asciende a \$612.448.74 al tipo de cambio de fecha de oferta.

Además, es importante acotar que no existe ningún otro tipo de reforzamiento conocido que permita mantener el puente en operación mientras se aplica. Tampoco cabe la posibilidad de colar una losa nueva por tramos debido a la vibración constante del puente.

El costo de rehabilitación de estructuras usando CFRP en losas de puentes puede verse afectado por las condiciones propias de cada estructura, tales como grado de deterioro, reparación del sustrato, remoción de capas asfálticas existentes, accesibilidad para el personal a la estructura, requisitos de diseño, etc.

Los sistemas de reforzamiento estructural CFRP constituyen una excelente alternativa, y con el uso masivo, su precio tenderá a ser aún más competitivo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benmokrane, B., & Rahman, H. (n.d.). *Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction*. Canada: University of Sherbrooke.
- Chapman, W. (1997). *Pre-qualification Requirements for Alternative Column Casings for Seismic Retrofit (Composites)*. Sacramento, CA: California Department of Transportation.
- CSA. (2006). *Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers*. Canadian Standards Association.
- Dolan, C. W., Rizkalla, S. H., & Nanni, A. (1999). *Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structure*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Fardis, M. N., & Khalili, H. (1981). *Concrete Encased in Fiberglass Reinforced Plastic* (Vol. 78). ACI Journal Proceedings.
- Fleming, C. J., & King, G. (1967). *The Development of Structural Adhesives for Three Original Uses in South Africa*. Paris: Bulletin rilem.
- Grupo de Estudio JICA et al. (2007). *Estudio de Desarrollo de Capacidad en la Planificación de la Rehabilitación, Mantenimiento y Administración de Puentes basado en 29 Puentes de la Red Vial Nacional en Costa Rica*. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- Hassan, T., & Rizkalla, S. (2002). *Flexural Strengthening of Prestressed Bridge Slabs with FRP Systems* (Vol. 47). PCI Journal.
- IMCYC. (2000, Agosto). Relleno de fisuras en obras de concreto armado. (I. M. Concreto, Ed.) *Revista Construcción y Tecnología*.
- International Federation for Structural Concrete. (2001). *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. Lausanne: FIB.
- Katsumata, H., Kobatake, Y., & Takeda, T. (1988). A Study on the Strengthening with Carbon Fiber for Earthquake-Resistant Capacity of Existing Concrete Columns, Proceedings from the Workshop on Repair and Retrofit of Existing Structures. *Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, (pp. 517-522).
- Meier, U. (1987). Bridge Repair with High Performance Composite Materials. *Material und Technik*, 4, 125-128.
- Nanni, A. (1995, June). Concrete Repair with Externally Bonded FRP Reinforcement. *Concrete International*, 17(6), 22-26.
- Neale, K. W. (2000). FRPs for Structural Rehabilitation: A Survey of Recent Progress. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(2), 133-138.
- Neale, K. W., & Labossiere, P. (1997). State-of-the-art report on retrofitting and strengthening by continuous fibre in Canada. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 25-39.
- Ortiz, G. (2018). Estadísticas generales Puentes de rutas nacionales. Cartago, Costa Rica: CIVCO.
- Rendón, J. (2015, Agosto 05). *Sika Colombia*. Retrieved from https://col.sika.com/dms/getdocument.get/...3002.../co-ht_SikaWrap%20300C.pdf
- Rostasy, F. S. (1987). *Bonding of Steel and GFRP Plates in the Area of Coupling Joints, Talbrucke Kattenbusch*. Braunschweig, Alemania: Federal Institute for Materials Testing.
- Saadatmanesh, H., & Ehsani, M. R. (1998). Second International Conference on Composites in Infrastructure., 1-2. Tucson, AZ.
- Shield, C. K., Busel, J. P., Walkup, S. L., & Gremel, D. D. (2005). Proceedings of the Seventh International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-7). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Wolf, R., & Miessler, H. J. (1989). HLV-Spannglieder in der Praxis. *Erfahrungen Mit Glasfaserverbundstaben*, 47-51.

7. APÉNDICES

Apéndice 1. Manual de campo para aplicación de sistemas de reforzamiento estructural con fibra de carbono (CFRP) (Fuente: Mitsubishi Replark)

DESCRIPCIÓN

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) es un sistema para la reparación y el refuerzo de estructuras de hormigón basado en hojas de fibra de carbono unidireccional o bidireccional de alta resistencia y resinas epóxicas. Su gran capacidad resistente y ligereza, así como su versatilidad y facilidad de aplicación le confieren las características idóneas para reparar estructuras dañadas y reforzar estructuras existentes por cambios de uso, adecuación a normativas, fallos de ejecución o de proyecto.

Disponible en varios espesores, gramajes, módulos elásticos y deformaciones unitarias para adaptarse a las necesidades de cálculo.

APLICACIONES

- Trabajos de rehabilitación de estructuras existentes.
- Refuerzo de elementos por cambio de uso del inmueble.
- Reparación de estructuras dañadas por accidentes y patologías.
- Rectificación de errores de proyecto y ejecución.
- Adaptación a las nuevas normativas de construcción.
- Reparación y refuerzo frente a sismos de edificios antiguos.
- Rehabilitación de puentes, chimeneas, silos y estructuras singulares.

VENTAJAS

- El sistema permite el refuerzo de elementos de hormigón a flexión y cortante, además del refuerzo de elemento sometidos a compresión mediante el confinamiento de los mismos.
- Pesa 5 veces menos que los refuerzos de acero.
- Espesores mínimos. Aumento mínimo en las secciones reforzadas, permitiendo conservar la geometría y apariencia original.
- Alta resistencia a tracción: 10 veces más que el acero y 3 veces más que la fibra de vidrio.
- Permite su aplicación sobre superficies complejas.
- Alta resistencia a la fatiga.
- Durabilidad. No presenta posibilidad de corrosión, resistente en ambientes marinos y ante la acción de los ciclos hielo-deshielo.
- Económico. Gran facilidad y rapidez de instalación, reduce sustancialmente la necesidad de empleo de medios auxiliares.
- Sistema versátil: Permite ajustar el refuerzo al necesario en cada punto de la estructura, con el empleo de distintos anchos y número de capas.

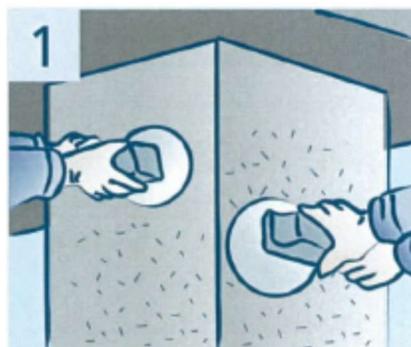
MODO DE EMPLEO

Preparación del sustrato

Antes de comenzar la aplicación, el sustrato debe ser preparado adecuadamente.

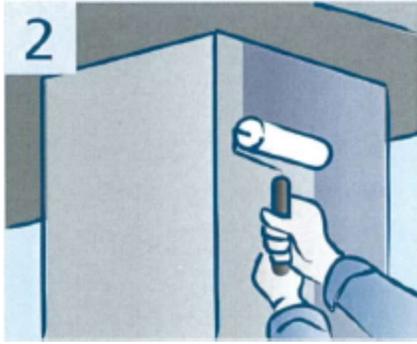
El sustrato debe ser estructuralmente resistente. En caso de necesidad de reparación, utilice morteros de reparación estructural. Por otro lado, si las armaduras presentan corrosión, éstas deben limpiarse y eliminar todo el óxido para posteriormente recubrirlas con mortero de reparación estructural.

Si existen fisuras o grietas en el hormigón con un espesor superior a 0,25 mm, éstas se deben reparar mediante la inyección de resinas epóxicas de baja viscosidad según la temperatura ambiental, para prevenir alguna posible infiltración de agua y reponer la resistencia del concreto.

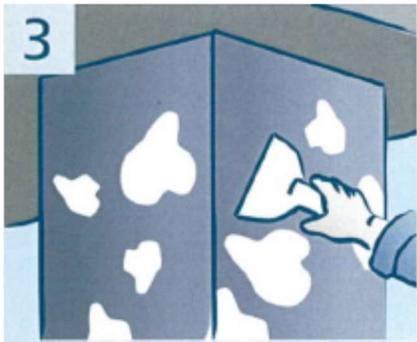


A continuación, proceder a preparar la superficie mediante desbastado con disco abrasivo de diamante eliminando pinturas, yeso, lechadas superficiales, eflorescencias, grasas, restos de aceites desencofrantes y cualquier otra sustancia que pudiera afectar negativamente a la adherencia.

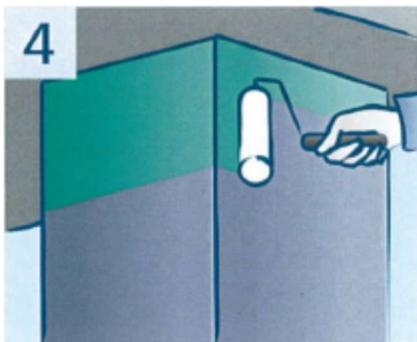
En refuerzos por confinamiento de pilares y a cortante en vigas, las esquinas del elemento se deben biselar y redondear, con un radio al menos de 3 cm siendo recomendable un radio mayor, para evitar puntos de acumulación de tensiones de corte alrededor de bordes afilados, ya que se produce una reducción significativa de la resistencia a la tracción en dichos puntos llegando incluso a provocar roturas de la lámina y fallo del sistema antes de alcanzar los valores de diseño.



Una vez reparado el elemento, esperar hasta que el contenido de humedad sea menor al 4%, a continuación, aplicar la imprimación con resina para temperaturas entre 15 °C y 35 °C. Mezclar en las proporciones adecuadas, cuatro partes de agente principal por una parte de endurecedor (4:1) en peso, y aplicar con rodillo. Permitir el secado hasta que no sea pegajosa al tacto.



Si la superficie presenta pequeñas concavidades o coqueas con profundidad menor de 5 mm, utilizar masilla de nivelación en función de la temperatura ambiente. Mezclar en proporción de dos partes de agente principal por una parte de endurecedor (2:1) en peso y aplicar con paleta flexible creando una superficie lisa para la posterior aplicación de la fibra de carbono. Permitir su secado el tiempo necesario hasta que no se pegue al tacto. Preparación del sistema



Para la colocación de la hoja de fibra de carbono utilizar resina epóxica indicada por el fabricante, en

función de la temperatura ambiental. Mezclar en las proporciones adecuadas, cuatro partes de agente principal por una parte de endurecedor (4:1) en peso. La resina funciona como adhesivo para el pegado de la hoja de la fibra de carbono a la superficie de concreto. Igualmente, penetra entre las fibras de carbono, las cuales al curar forman el compuesto que reforzará la estructura.

Antes de proceder a aplicar la primera capa de adhesivo, es conveniente cortar las hojas de fibra de carbono a utilizar de acuerdo con los planes de trabajo que se hayan realizado. La fibra de carbono se cortará con tijeras o cuchilla afiladas no siendo recomendable longitudes superiores a los 6 m al objeto de evitar que se arruguen.

Los trozos de lámina cortados deben almacenarse ordenándolos de acuerdo con la prioridad en su colocación. Durante el almacenaje se evitará doblarlos o arrugarlos, debiendo colocarlos en un lugar donde no se contaminen por polvo o humedad.

Aplicación

Aplicación de una sola capa



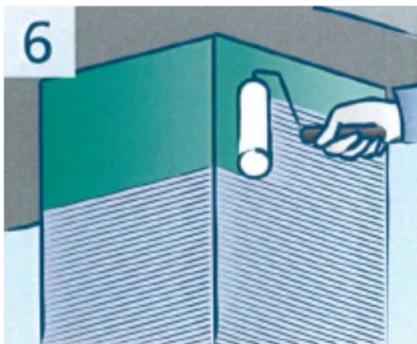
La misión de la primera capa de adhesivo, es adherir la hoja de refuerzo de carbono a la superficie de concreto y, al mismo tiempo crear una lámina de elevadas características mecánicas conseguida al penetrar la resina entre las fibras e impregnarlas. Esta capa va a servir de puente de transmisión de los esfuerzos desde el concreto a la lámina de fibra de carbono de refuerzo. El adhesivo se aplicará mediante un rodillo de cerdas cortas o cepillo sobre la superficie del hormigón, debiendo intensificar la aplicación en los ángulos de los elementos a reforzar.

Inmediatamente después de dar la primera capa de resina y estando aún ésta fresca, se procederá a extender las hojas de fibra de carbono. El tiempo disponible para aplicar la hoja, contado desde el momento de la aplicación de la resina, es de unos 20 minutos.

La hoja se coloca sobre la superficie de concreto a la que se ha aplicado el adhesivo epóxico apretando contra la superficie para que se consiga un buen pegado. Una vez unida perfectamente la lámina, se la

presiona mediante un rodillo metálico para que quede perfectamente asentada sobre la superficie del hormigón, y para que el adhesivo penetre entre las fibras y las impregne, a la vez que se eliminan las burbujas de aire que puedan quedar atrapadas. Es muy importante hacer rodar el rodillo tan solo en la dirección de las fibras a fin de no dañarlas o desalinearlas.

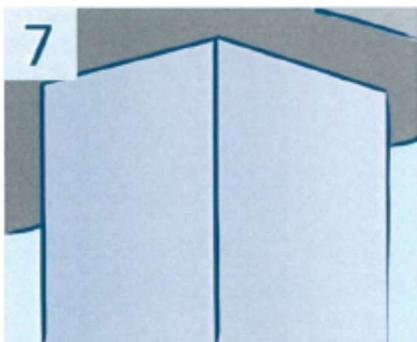
Para el empalme de hojas en dirección longitudinal, el traslape debe ser de al menos 15 cm. Cuando se coloquen dos láminas una al lado de la otra y con las fibras paralelas, aunque no es necesario que éstas se traslapen lateralmente, si es conveniente que exista un solape de 1 cm a fin de asegurar que la lámina de - carbono cubra perfectamente la superficie del hormigón.



Una vez aplicada la hoja y asentada, deben esperarse unos 30 minutos para permitir que la resina impregne bien todas las fibras de carbono de la misma, debiendo darse después una capa de terminación o acabado realizada con resina, siendo recomendable realizarlo el mismo día de la aplicación de la hoja.

La resina de acabado se aplicará mediante rodillo o cepillo y siempre en la dirección de las fibras. Con esta capa se termina la aplicación salvo que se aplique posteriormente una capa de protección o de coloración.

Finalizada la aplicación del sistema CFRP, se debe comprobar visualmente que no se han formado bolsas de aire.



Aplicación multicapa

Si el refuerzo estuviese compuesto por varias hojas de fibra de carbono, la capa de resina que hemos denominado de terminación o acabado, en el caso de aplicar una sola hoja, actuaría de impregnación al colocar la segunda hoja, y así sucesivamente, pero terminando siempre con una capa de resina de acabado. En este caso, la capa de adhesivo aplicada sobre la lámina y que pegará a la siguiente, es más gruesa, por lo que el rendimiento de la aplicación varía. La lámina de fibra de carbono debe aplicarse antes de transcurrir 20 minutos de la aplicación del adhesivo.

Si el refuerzo lleva varias hojas y se va a realizar en un solo día, se recomienda no aplicar más de dos hojas en el caso de superficies horizontales ni más de tres en el de superficies verticales para evitar que se descuelguen.

Si el refuerzo se va a realizar en varios días y en capas múltiples, es recomendable acabar cada día con una capa de resina de acabado. Al día siguiente habrá que aplicar una capa nueva de adhesión sobre la de acabado aplicada el día anterior y seguir el proceso.

Cuando se trata de reforzar superficies grandes y que requieran capas múltiples se tendrá en cuenta las mismas indicaciones en traslapes que para la colocación de una sola hoja.

Condiciones de aplicación

Dependiendo de la temperatura ambiental se deben elegir las resinas adecuadas. Existen versiones que son para temperaturas comprendidas entre los 15 °C y los 35 °C, las y otras versiones que se utilizan en el intervalo de temperaturas de 5 °C a 15 °C.

Cuando la temperatura ambiente, o la de la superficie del concreto donde se va a aplicar el compuesto epóxico, es inferior a 5 °C lo más conveniente es suspender la aplicación debido a que la reacción entre los dos componentes se hace muy lenta o nula y no se produce el endurecido o curado. Si no se puede suspender la aplicación cabe la posibilidad de crear un recinto cerrado alrededor de los elementos a reforzar y colocar en su interior un sistema de calefacción. Por el contrario, cuando la temperatura es superior a 35 °C la velocidad de reacción es muy rápida y la vida útil se reduce mucho, así como el tiempo abierto de aplicación, lo que obliga además a utilizar los productos menos reactivos, por tanto se debe planificar muy bien el trabajo para realizar las operaciones de refuerzo de forma rápida.

Curado

El endurecimiento o curado completo de la resina tiene lugar entre los 5 y 14 días, dependiendo del tipo de resina utilizado y de la temperatura del soporte según se indica en el apartado de Datos Técnicos. Antes de

estos días no debe entrar en carga el elemento reforzado.

Limpieza de herramientas

Todas las herramientas y utensilios de trabajo se deben limpiar con algún solvente indicado por el fabricante antes de que cure el adhesivo. Una vez curadas, sólo es posible eliminarlas por medios mecánicos.

CONSUMO APROXIMADO DE APLICACIÓN

PRODUCTO	CONSUMO
Imprimador (kg/m ²)	0,1 a 0,5
Masilla de nivelación (kg/m ²)	0,5 a 1,5
Resina adherencia (kg/m ²)	0,6 a 0,8

INDICACIONES IMPORTANTES

El concreto sobre el que se realiza un refuerzo debe ser sano y poseer una resistencia mínima a compresión, a 28 días, no inferior a 15 N/mm² medida en espécimen de 15 x 30 cm.

Las caras sobre las que se aplica el refuerzo deben ser lo más planas posibles lo cual puede comprobarse con una regla rígida de 3 m de longitud no debiendo dar lugar a falta de planeidad superior a 2 mm.

El sistema CFRP se emplea sobre un concreto sano y seco y su misión es incrementar su capacidad resistente frente a una determinada sollicitación de tipo mecánico, por tanto, con este sistema no se resuelve en problemas relacionados con la durabilidad de la estructura como eliminación o frenado de la corrosión de armaduras, extracción de cloruros, sellar vías de agua, etc.

Si la superficie del concreto esta mojada se producirá la emulsión del adhesivo o resina aplicada con lo cual la adhesión fallará. Si el hormigón no está mojado pero tiene una humedad elevada en el momento de hacer la aplicación del sistema puede que la tensión de vapor producida por la evaporación del agua interior de lugar al despegue de la lámina, de aquí lo importante que es controlar la humedad existente.

Durante la ejecución del sistema CFRP el recinto de trabajo debe estar exento de polvo y especialmente protegido para evitar que penetre en él agua de lluvia; si esto no se pudiese evitar deben protegerse los elementos a reforzar con cubiertas plásticas o de otro tipo pero que no estén en contacto con la resina hasta que ésta haya endurecido.

Para cualquier aclaración o información adicional, consulte con el proveedor o representante del fabricante.

PRESENTACIÓN

Las hojas de fibra de carbono están disponibles en diferentes anchos dependiendo de la necesidad del diseño. Se presentan en rollos de 50 m y 100 m de longitud con anchos de 25 cm, 33 cm y 50 cm. Resinas

epóxicas se presentan en sets predosificadas de 15 kg para temperaturas entre 15 °C y 35 °C o para temperaturas entre 5 °C y 15 °C

CONSERVACIÓN

El tiempo de conservación de las hojas de fibra de carbono es ilimitado almacenado en su embalaje original sin abrir, en lugar seco, bajo cubierto, protegido frente el polvo, humedad, heladas y exposición directa al sol, con temperaturas entre 5 °C y 40 °C.

Las hojas de fibra de carbono se guardarán enrolladas sobre un núcleo cilíndrico de 300 mm de diámetro. Las que estén cortadas en hojas se encerrarán en contenedores de plástico, cuidando de que no se doblen o se plieguen. En cualquier caso, las láminas de fibras de carbono se protegerán para que no se deposite polvo sobre ellas ni entren en contacto con agua, dado que pueden disminuir sus características adherentes.

Las resinas epóxicas pueden permanecer doce meses a partir de su fecha de fabricación en su envase original cerrado, en lugar seco y cubierto protegido de la humedad, exposición directa al sol y las heladas, con temperaturas entre 5 y 30 °C. Almacenamientos prolongados y por debajo de las temperaturas indicadas pueden producir la cristalización de las resinas. En tal caso, para devolver al producto sus condiciones normales debe calentarse a temperatura moderada mientras se agita regularmente.

SEGURIDAD E HIGIENE

La fibra de carbono es conductora de la electricidad por lo que deben tomarse precauciones para que no entre en contacto con cables eléctricos dado que podría producir cortocircuitos, derivaciones y descargas eléctricas.

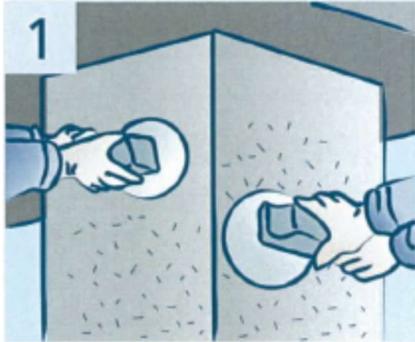
En la utilización de productos de base epóxica deben utilizarse guantes de goma, gafas, mascarilla y ropa adecuada. En caso de contacto con la piel, lávese con agua y jabón y no utilice bajo ningún concepto disolventes. Si se produce irritación después de lavarse con agua y jabón recurra al médico. En el caso de una proyección sobre los ojos aclarar con abundante agua limpia y recurrir a un oculista. Debe evitarse inhalar los vapores de los componentes epóxicos. Existen operarios que pueden ser alérgicos a los componentes de las resinas epóxicas, especialmente a algunos endurecedores, si esto ocurre no deben comprometerse en estos trabajos.

La zona de trabajo debe estar ventilada evitándose hacer fuego en las proximidades de los materiales epóxicos. Existe Hoja de Seguridad de cada uno de los productos a su disposición.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del consumidor final del producto.

Procedimiento constructivo gráfico para aplicar de fibra de carbono

Preparación de la superficie del concreto



Enmacillado (opcional)

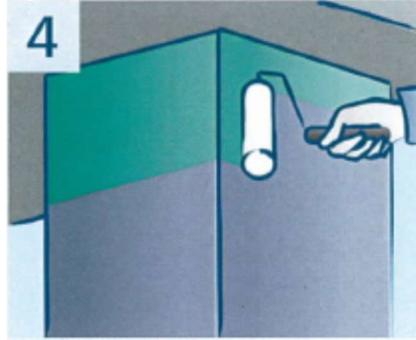
Imprimación de nivelación



Aplicación de resina ("undercoating")



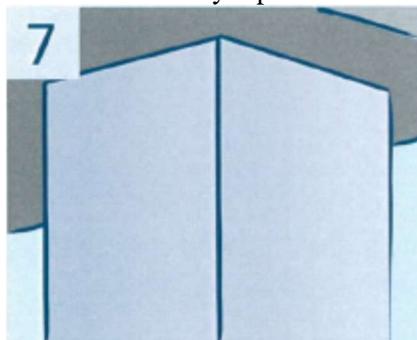
Aplicación de fibra de carbono



Aplicación de resina ("overcoating")



Acabado y/o pintura final



Apéndice 2. Memoria de cálculo para la determinación del costo por metro cuadrado de reforzamiento de losa con CFRP en colones

Proyecto:	Rehabilitación Puente sobre el Río Sarapiquí, Ruta Nacional No. 4		
Renglón	Descripción	Unidad	Cantidad
602B.A.	Suministro e instalación para el reforzamiento de losa con láminas de fibra de carbono CFRP 2 capas $f'_{scf}=1,9$ Kn/mm ² , $E_{cf}=640$ Kn/mm, $t_{ck} = 0,143$ mm.	m ²	959

Maquinaria					
No. equipos	Descripción/marca/modelo/potencia (HP)	Unidad de medida de rendimiento	Cantidad de horas	Costo por hora (colones)	Monto
1	Maquina soldadora	hora	0.200	12,929.29	2,585.86
1	Factor de herramienta menor	(%)mo	0.300	3,542.42	1,062.73
1	Planta Eléctrica Caterpillar	hora	0.200	39,919.71	7,983.94
Subtotal:					11,632.53

Personal					
	Descripción	Unidad de medida de rendimiento	Cantidad de horas	Costo por hora (colones)	Monto
1	Soldador	hora	0.200	3,171.72	634.34
1	Operario calificado	hora	0.200	2,378.79	475.76
1	Peón	hora	1.600	1,520.20	2,432.32
Subtotal:					3,542.42

Material					
	Descripción	Unidad de medida de rendimiento	Cantidad	Costo (colones)	Monto
	Factor de material menor	(%)m	0.050	59,065.68	2,953.28
	Imprimante PS-370	m ²	1.000	5,050.51	5,050.51
	Mortero epóxico C-270	m ²	1.000	6,060.61	6,060.61
	Resina de Impregnación XL-770H	m ²	1.000	10,101.01	10,101.01
	Imprimante xps-400	m ²	1.000	9,090.91	9,090.91
	Mortero de reparación L-600	m ²	1.000	7,070.71	7,070.71
	Obra falsa guindolas	un	0.000	2,525,252.53	479.80
	Resina de impregnación XL-800	m ²	1.000	6,060.61	6,060.61
	Fibra Replark MRK-M6-30	m ²	1.000	197,979.80	197,979.80
	Pintura Uretano acrílico	m ²	1.000	8,080.81	8,080.81
Subtotal:					252,928.05

Subtotal	268,103.00
Imprevistos	13,405.15
Administración	48,258.54
Utilidad	32,976.67
Precio unitario	362,743.36

Apéndice 3. Registro fotográfico de intervención Puente Sarapiquí



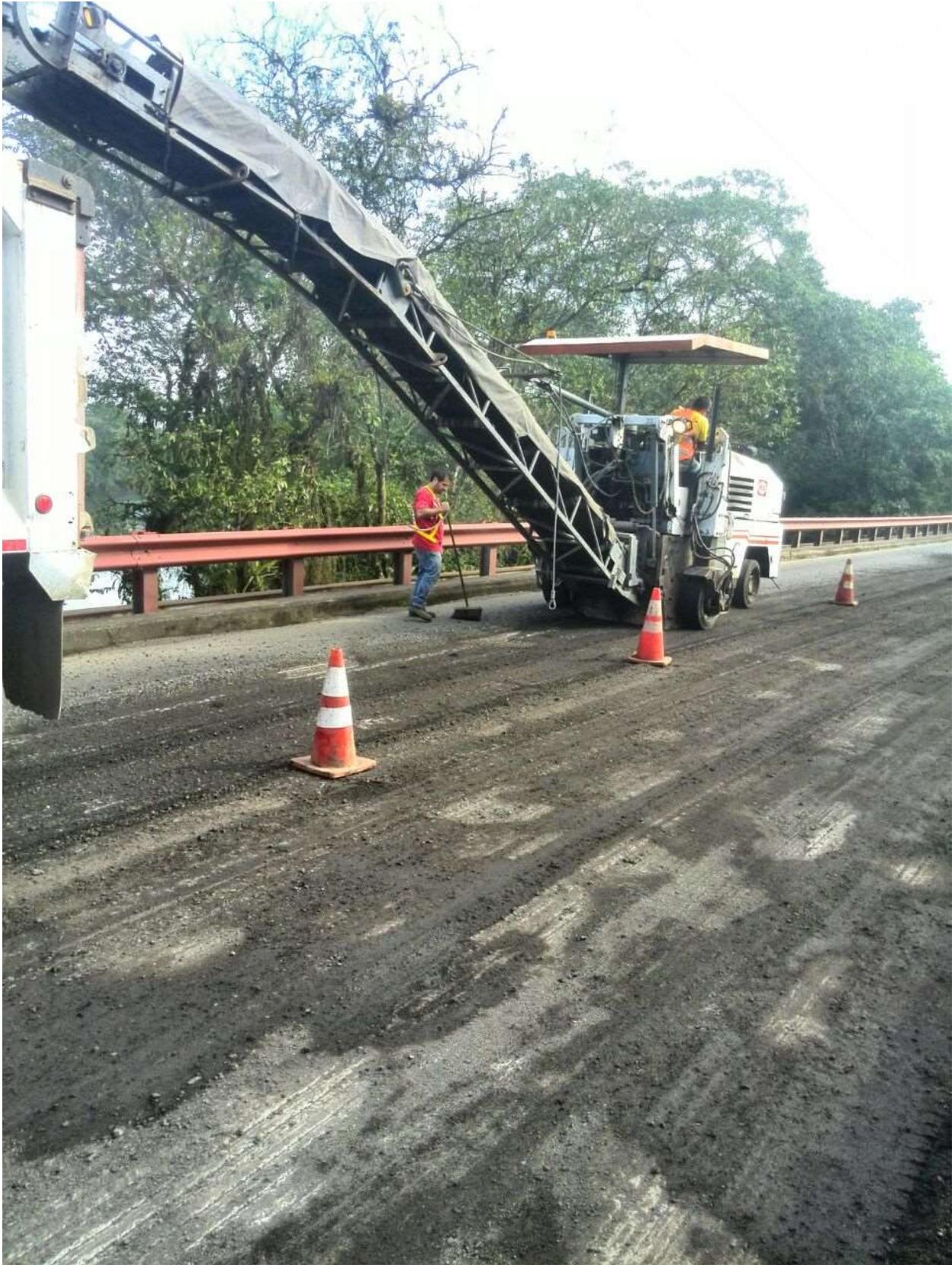
Vista lateral del puente sobre el Río Sarapiquí previo intervención



Vista inferior del puente sobre el Río Sarapiquí previo intervención



Losa del puente Sarapiquí previa intervención



Remoción de la capa asfáltica de la losa del puente Sarapiquí (Enero 2015)



Modificación de viga tipo Gerber a elemento continuo en superestructura (Febrero 2015)



Preparación de losa superior para sellado de grietas (marzo 2015)



Mapeo de grietas de la losa por debajo (marzo 2015)



Inyección de grietas en la losa (marzo 2015)



Grietas selladas



Preparación de la resina por parte de Tecnosagot (11 marzo 2015)



Colocación de la fibra de carbono por el técnico de Mitsubishi en Puente Sarapiquí (11 marzo 2015)



Eliminación de burbujas de aire utilizando espátula



Impregnación de resina para segunda capa de fibra de carbono con rodillo (overcoating)



Vigas reparadas y pintadas post intervención.

Apéndice 4. Listas de verificación para control del proceso

1. Control de entrada de materiales a bodega de proyecto

La idea es por medio de este formulario llevar el control de entrada de los materiales a bodega en sitio. Lote de entrada será el consecutivo de cada vez que Tecnosagot ingrese materiales al proyecto, este numero de lote será anotado en el espacio que aparece en la boleta de salida.

Se registran las fechas como las condiciones ambientales que presenta el lugar, de esta manera si se notan fuera de lo recomendado deberán de buscarse las adecuaciones necesarias.

El equipo de medición con que se toman las medidas, debe anotarse por formalismo principalmente.

Epóxicos:

Cada tarro (envase) de material cuenta con un código propio del fabricante, como una especie de código de barras se anotarán todos los códigos que ingresen, esto lo que permite es llevar el control de cuánto tiempo permanecen almacenados los materiales en la bodega del proyecto.

Habitualmente se hacen más salidas que entradas de material, por los volúmenes de trabajo, por esto se llevan los controles por separado, se anotan al igual que con las entradas las condiciones ambientales de la bodega, fechas.

En el espacio de los epóxicos se anota únicamente el código de fábrica del envase que sale seguido del Lote de entrada. Esto se hace para cada una de las resinas que salgan en su momento.

Control de entrada de materiales a bodega de proyecto.

Lote: ▲ 0001 ▼

Fecha de Entrada: 1/12/2015 Humedad: 23.0% Equipo: _____
Temperatura: 30.0 °C Marca: H
Modelo: IDA 098

Epóxicos

PS 370H: _____ XPS 400: _____
C 270H: _____ L 600: _____
XL 770H: _____ XL 800: _____

Inspector: _____

Salida: ▲ 0001 ▼

Fecha de Salida: 11/12/2015 Humedad: 23.0% Equipo: _____
Temperatura: 30.0 °C Marca: H
Modelo: IDA 098

Epóxicos

PS 370H: DH03891- 0001 XPS 400: _____
C 270H: _____ L 600: _____
XL 770H: _____ XL 800: _____

Inspector: _____



2. Control de la instalación de la fibra de carbono en la parte inferior de la losa del puente

Para el formulario de instalación es necesario el diagrama de división de la losa, en donde se divide la losa por el número de paños que se requieren para la instalación de la fibra.

Los sectores se clasifican en:

Superior (S):

En número que sigue de la letra corresponde a la franja de fibra que se coloca, en la parte superior son 5, que se numeran de derecha a izquierda, iniciando aguas arriba.

Inferior (I):

De igual forma en la parte inferior de la losa, corresponden 4 franjas y se numeran de la misma manera

Lo siguiente que aparece es la letra **P** que corresponde a paño, eso aparece en todos, no se cambia, seguido de un número de 2 dígitos, ese corresponde al número de paño que se está colocando

Esa es una numeración de los paños longitudinales que se colocan de fibra en la losa del puente.

Luego está el control de la aplicación de las resinas, según la teoría, lo importante es el control de humedad y temperatura en cada una de las capas que se estén aplicando, de igual forma la dosificación y mezclado de las resinas.

Por esto, lo que se hace es una medición de los factores ambientales de cada uno, dado que cada resina se aplica con un día de diferencia una de la otra prácticamente se mide lo mismo

Con las tablas de **Dosificación Inferior y Dosificación Superior** elaboradas por Tecnosagot se completan los demás espacios del cuadro de control.

Estos formularios se encuentran en formato Excel para facilitar la digitación de la información cotidianamente en el proyecto.

Control de calidad y avance de obra en la colocación de fibra de carbono en la parte inferior de la losa para la Rehabilitación del Puente sobre el Río Sarapiquí, Ruta Nacional No. 4.

Sector : I 1 P 0 5

Producto XPS-400 **Descripción:** Imprimante

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
 Hora: _____ Observaciones: _____
 Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
 Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
 Observaciones del proceso de curado: _____

Producto L-600 **Descripción:** Putty

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
 Hora: _____ Observaciones: _____
 Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
 Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
 Observaciones del proceso de curado: _____

Producto XL-800 **Descripción:** Impregnación antes de fibra 1

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
 Hora: _____ Observaciones: _____
 Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
 Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
 Observaciones del proceso de curado: _____

Producto XL-800 **Descripción:** Impregnación despues de fibra 1

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
 Hora: _____ Observaciones: _____
 Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
 Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
 Observaciones del proceso de curado: _____

Producto XL-800 **Descripción:** Impregnación antes de fibra 2

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
 Hora: _____ Observaciones: _____
 Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
 Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
 Observaciones del proceso de curado: _____

Producto XL-800 **Descripción:** Impregnación despues de fibra 2

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
 Hora: _____ Observaciones: _____
 Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
 Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
 Observaciones del proceso de curado: _____

Progreso General del trabajo

Avance inicial: _____ (m²)
 Avance final: _____ (m²)

3. Control de la instalación de la fibra de carbono en la parte superior de la losa del puente

Control de calidad y avance de obra en la colocación de fibra de carbono en la parte superior de la losa para la Rehabilitación del Puente sobre el Río Sarapiquí, Ruta Nacional No. 4.

Sector : S 1 P 0 5

Producto PS-370H

Descripción: Imprimante

Fecha: _____

Humedad Relativa: _____ %

Humedad Superficie: _____ %

Hora: _____

Observaciones: _____

Descripción de limpieza:

Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla:

Producto A: _____ (%)

Producto B: _____ (%)

Tiempo de mezcla: _____ (minutos)

Área cubierta: _____ m²

Observaciones del proceso de curado: _____

Producto C-270H

Descripción: Ligante

Fecha: _____

Humedad Relativa: _____ %

Humedad Superficie: _____ %

Hora: _____

Observaciones: _____

Descripción de limpieza:

Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla:

Producto A: _____ (%)

Producto B: _____ (%)

Tiempo de mezcla: _____ (minutos)

Área cubierta: _____ m²

Observaciones del proceso de curado: _____

Producto C-270H

Descripción: Mortero

Fecha: _____

Humedad Relativa: _____ %

Humedad Superficie: _____ %

Hora: _____

Observaciones: _____

Descripción de limpieza:

Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla:

Producto A: _____ (%)

Producto B: _____ (%)

Tiempo de mezcla: _____ (minutos)

Área cubierta: _____ m²

Observaciones del proceso de curado: _____

Producto XL-770H

Descripción: Impregnación antes de fibra 1

Fecha: _____

Humedad Relativa: _____ %

Humedad Superficie: _____ %

Hora: _____

Observaciones: _____

Descripción de limpieza:

Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla:

Producto A: _____ (%)

Producto B: _____ (%)

Tiempo de mezcla: _____ (minutos)

Área cubierta: _____ m²

Observaciones del proceso de curado: _____

Control de calidad y avance de obra en la colocación de fibra de carbono en la parte superior de la losa para la Rehabilitación del Puente sobre el Río Sarapiquí, Ruta Nacional No. 4. (continuación)

Producto XL-770H **Descripción:** Impregnación después de fibra 1

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
Hora: _____ Observaciones: _____
Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
Observaciones del proceso de curado: _____

Producto XL-770H **Descripción:** Impregnación antes de fibra 2

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
Hora: _____ Observaciones: _____
Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
Observaciones del proceso de curado: _____

Producto XL-770H **Descripción:** Impregnación después de fibra 2

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
Hora: _____ Observaciones: _____
Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
Observaciones del proceso de curado: _____

Producto C-270H **Descripción:** Ligante

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
Hora: _____ Observaciones: _____
Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
Observaciones del proceso de curado: _____

Producto C-270H **Descripción:** Mortero

Fecha: _____ Humedad Relativa: _____ % Humedad Superficie: _____ %
Hora: _____ Observaciones: _____
Descripción de limpieza: Excelente Buena Regular Pésima

Proporción de mezcla: Producto A: _____ (%) Producto B: _____ (%)
Tiempo de mezcla: _____ (minutos) Área cubierta: _____ m²
Observaciones del proceso de curado: _____

Progreso General del trabajo

Avance inicial: _____ (m²)
Avance final: _____ (m²)

8. ANEXOS

Anexo 1. Cotización de fibra de carbono por parte de Mitsubishi Plastics:

Cuadro 1. Desglose de costos – Puente sobre el Río Sarapiquí

ITEM	ACTIVIDAD	UND	CANT	PRECIO UNITARIO	TOTAL
A Adherencia para concreto estructural (sello)					
1	Suministro de materiales para adherencia para concreto estructural (sello)	m	250	€63.555,98	€15.888.993,78
2	Instalación de sistema para adherencia para concreto estructural (sello)	m	250	€9.889,39	€2.472.346,55
B Adherencia para concreto estructural (plaste epóxico)					
1	Suministro de materiales para adherencia para concreto estructural (plaste epóxico)	l	85	€6.445,62	€547.877,87
2	Instalación de sistema para adherencia para concreto estructural (plaste epóxico)	l	85	€7.325,47	€622.665,06
C Suministro de reforzamiento de losa con CFRP					
1	Suministro de reforzamiento de losa con CFRP	m2	959	€255.802,10	€245.314.214,66
D Instalación de reforzamiento de losa con CFRP					
1	Instalación de reforzamiento de losa con CFRP	m2	959	€38.987,50	€37.389.011,72
E Impermeabilidad					
1	Suministro de materiales para Impermeabilidad	m2	727	€27.216,74	€19.786.571,42
2	Instalación de sistema de Impermeabilidad	m2	727	€28.404,89	€20.650.353,99
F Juntas de Expansión					
1.1	Suministro de juntas dentadas t=200mm	m	15	€1.944.053,00	€29.160.794,98
1.2	Instalación de juntas dentadas t=200mm	m	15	€622.914,22	€ 9.343.713,34
*	Suministro de Juntas CEVA t=50 mm	m	21	€115.000,00	€2.415.000,00
**	Instalación de Juntas CEVA t=50 mm	m	21	€249.900,00	€5.247.900,00
GRAN TOTAL					€381.176.543,35