

52



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

“ TÉCNICAS AVANZADAS PARA EL REFUERZO
DE SUPERESTRUCTURAS PARA PUENTES
CARRETEROS “

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
ALBERTO SUBOTAI KING DELGADO

DIRECTOR DE TESIS:
Dr. ROBERTO GÓMEZ MARTÍNEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO D.F. SEPTIEMBRE DEL 2000.

283039



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/052/00

Señor
ALBERTO SUBOTAI KING DELGADO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. ROBERTO GOMEZ MARTINEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**

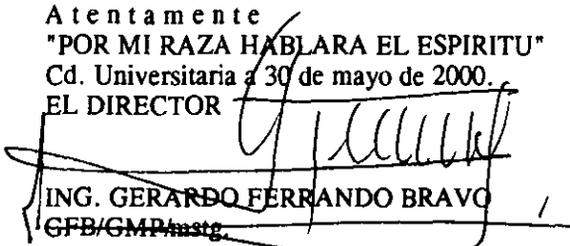
**"TECNICAS AVANZADAS PARA EL REFUERZO DE SUPERESTRUCTURAS
PARA PUENTES CARRETEROS"**

- INTRODUCCION**
- I. TECNICAS CONVENCIONALES PARA EL REFUERZO DE PUENTES. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS**
 - II. REFUERZO DE SUPERESTRUCTURAS DE PUENTES MEDIANTE ELEMENTOS LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO**
 - III. REVISION DE LOSAS CON DOS NERVADURAS DE CONCRETO REFORZADO, REFORZADAS MEDIANTE ELEMENTOS LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO**
 - IV. CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 30 de mayo de 2000.
EL DIRECTOR


ING. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

AGRADECIMIENTOS

A mi *madre*, por enseñarme el valor de luchar en la vida.

A mi *padre*, por ser el ejemplo de mi vida

A mi *hermano*, por ser mi compañero y amigo incondicional.

A mi *abuela* y mis tíos: *Ernesto, Rubén, Roberto y Josefina*, por su apoyo; así como a mis tíos: *Gloria, Olga y Carlos B.*, por su constante preocupación.

Al *Dr. Roberto Gómez*, por ser mi maestro, asesor y amigo, quién ha tenido a bien de guiarme por el interesante campo de la Ingeniería de Puentes.

A mis amigos, quienes me han hecho sentir afortunado de contar con uno los valores más grandes que un hombre puede llegar a tener: el valor de la Amistad. En especial a *Fabricio, Gabriel, Julio, Manuel, Raúl y Toño*.

A mis compañeros y amigos en el Instituto de Ingeniería: *Carlos David y Victor*.

Muy especialmente y a manera de un sencillo homenaje quiero dedicarle este trabajo a el *Ing. Carlos King Revelo*, destacado profesional, maestro, espléndido ser humano, orgullo e inspiración para todos aquellos que nos dedicamos a la Ingeniería de Puentes; quien durante gran parte de su vida la dedicó al crecimiento y a la formación de profesionales en el área de la Ingeniería de Puentes en nuestro país.

RESUMEN

Se describen diferentes técnicas que se usan para el refuerzo de superestructuras de concreto reforzado de puentes carreteros. Se presentan las ventajas y desventajas de la utilización de cada una de ellas y se discuten algunos aspectos constructivos. Se mencionan las condiciones mecánicas, así como las consideraciones de análisis para el refuerzo con elementos laminados de fibras de carbono de tramos simplemente apoyados de un puente de losas con dos nervaduras de concreto reforzado (SAHOP, 1963). Se hacen comparaciones de estas losas, suponiendo que han sido dañadas por agentes ambientales y reforzadas con elementos laminados de fibras de carbono.

ABSTRACT

Different techniques for strengthening highway reinforced concrete bridge superstructures are presented. Advantages and inconveniences of using each technique are described. Some construction aspects are discussed as well. Mechanical conditions are described and a base methodology for the reinforcement with carbon fiber laminate elements are applied. A general comparison of the results of the analysis is performed supposed that ambiental agents affect the behavior of the concrete beams and strengthening with carbon fiber laminate elements.

INDICE**INTRODUCCIÓN**

1. TÉCNICAS CONVENCIONALES PARA EL REFUERZO DE SUPERESTRUCTURAS DE PUENTES. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS	1
1.1. Presfuerzo adicional externo	2
1.1.1. Dimensionamiento del presfuerzo	2
1.1.2. Configuración del presfuerzo	3
1.1.3. Instalación del presfuerzo adicional	4
1.1.4. Inyección de fisuras	8
1.1.5. Protección de cables adicionales	8
1.1.6. Ensayos de verificación	10
1.2. Placas de acero adheridas	11
1.2.1. Alcances de la técnica	11
1.2.2. Diseño	12
1.2.2.1. Principios básicos	12
1.2.2.2. Diseño de placas de refuerzo	12
1.2.2.3. Diseño de pernos	12
1.2.3. Adhesivo. Pruebas y propiedades	13
1.2.4. Preparación de la superficie	15
1.2.4.1. Superficies de acero	15
1.2.4.2. Superficies de concreto	16
1.2.5. Aplicación del adhesivo	16
1.2.6. Control de calidad	18
2. REFUERZO DE PUENTES MEDIANTE ELEMENTOS LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO	19
2.1. Proceso de aplicación de los elementos de fibras de carbono	21
2.2. Notas preliminares de aplicación	22
2.3. Pasos para la aplicación	24
2.3.1. Preparación preliminar	24
2.3.2. Restauración de la sección transversal del concreto	24
2.3.3. Corrección de defectos en la superficie del concreto	25
2.3.4. Aplicación de la cubierta inicial (primer)	26
2.3.5. Pegado de los elementos laminados de fibras de carbono	29
2.3.6. Control de calidad e inspección	31
2.3.7. Cubierta final	32
2.4. Control de calidad e inspección	34
2.4.1. Control de calidad del material	34
2.4.2. Control de calidad en el proceso	34

2.4.3. Inspección para evitar delaminaciones	34
2.4.4. Pruebas del material	35
2.4.5. Reporte	35
2.5. Control de Seguridad	36
3. REVISIÓN DE LOSAS CON DOS NERVADURAS DE CONCRETO REFORZADO, REFORZADAS MEDIANTE ELEMENTOS LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO	37
3.1. Generalidades	40
3.1.1. Diagrama de flujo para efectuar la revisión de una trabe a flexión	40
3.1.2. Criterio de revisión	41
3.1.3. Estructura por revisar	43
3.1.4. Efectos a considerar	43
3.1.5. Propiedades mecánicas de los materiales	44
3.1.6. Metodología	45
3.2. Revisión de losas con dos nervaduras de concreto reforzado	46
3.2.1. Comentarios	48
3.3. Revisión de losas con dos nervaduras dañadas de concreto reforzado	50
3.3.1. Comentarios	52
4. CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	59

INTRODUCCIÓN

Parece una idea muy generalizada, que las obras de infraestructura, y muy en particular los puentes, tienen una vida útil muy larga y que no existen razones para su deterioro. Esta opinión quizá sea producto de la observación de puentes que se construyeron hace más de 2000 años y que aún se encuentran en servicio. Sin embargo, no hay que olvidar que a pesar de que existen obras antiguas que aún podemos seguir admirando, las demás han desaparecido o han dejado de funcionar.

No podemos soslayar que los puentes, así como cualquier otra construcción, se deterioran y debilitan con el tiempo, y en un plazo más o menos largo acaban por fallar. En este sentido, los ingenieros responsables de las obras de infraestructura, y en especial de los puentes debiesen saber que la vida útil de estas obras dista mucho de ser infinita y que su funcionamiento depende en forma importante de inspecciones y mantenimiento.

Ahora bien, entre las causas y razones que obligan a reforzar o reparar un puente podemos contar con las siguientes:

- 1) Errores en el proyecto, errores durante la construcción, vigilancia, mantenimiento o reparaciones inexistentes o inadecuadas.
 - 2) Uso de materiales inadecuados o deterioro y degradación de los mismos.
 - 3) Variación con el tiempo de las condiciones de tráfico - aumento de las cargas vivas y velocidad de circulación de los vehículos -
-

- 4) Acciones naturales de tipo físico, mecánico o químico.
- 5) Acciones accidentales, terremotos, avalanchas, explosiones, impacto de vehículos con elementos resistentes del puente, etc.

Desde el punto de vista estructural se puede considerar que el refuerzo o reparación de los puentes es debido, en general, a una de las tres razones siguientes:

- a) Necesidad funcional de aumentar la capacidad de carga de un puente en buen estado.
- b) Corregir ciertas fallas, que en su caso hayan detectadas que hacen suponer que ha disminuido la capacidad de carga prevista inicialmente.
- c) Saneamiento, reparación y refuerzo sometidos al deterioro natural del tiempo.

Cabe hacer notar que si se requiere realizar una reparación o un refuerzo que sea eficaz y duradero, es imprescindible tener un diagnóstico previo el cual deberá ser acertado y completo; no es suficiente conocer las deficiencias del puente, sino que es necesario saber cómo, cuando y por qué se han producido, ya que únicamente así se garantizará el tratamiento más adecuado. Un refuerzo o reparación basado en un diagnóstico erróneo o incompleto puede producir, en muchos casos, males mayores que los que se requieren resolver.

Para el caso de este trabajo, el incremento en las dimensiones de los vehículos de carga, así como en la magnitud de la misma carga y su frecuencia de paso, han dado lugar a serias dudas sobre la seguridad de los puentes carreteros en México, ya que según los límites definidos en el diario oficial de 1994, en la actualidad está permitida la circulación de camiones con más de 13 ejes con un peso máximo de 143 t.

Lo anterior contrasta con el hecho de que entre los años 1950 a 1970, una gran parte de los puentes federales fueron diseñados con la carga viva

denominada HS15 de las especificaciones estándar AASHTO de su época, con un peso total de 24.5 t; después de 1970 se empezaron a diseñar los puentes con la carga viva HS20 con un peso total por camión de 32.8 t. A partir de 1980 en el Diario Oficial de la Federación se publicó la autorización para la circulación de camiones denominados T3-S3 y T3-S2-R4 con carga total de 46.0 y 77.5 t, respectivamente. Es hasta el año de 1994 que se autoriza la circulación de camiones con 13 ejes y 143 t de peso.

Cabe hacer notar, que actualmente las últimas especificaciones AASHTO (LRFD) para la evaluación y diseño de las estructuras de puentes carreteros ordinarios, han cambiado su filosofía y se recurre ahora a criterios de confiabilidad estructural, mediante la aplicación de factores que toman en cuenta la variabilidad de las condiciones de carga y resistencia, incluyendo la influencia de las características de redundancia, ductilidad y operacionalidad del puente; con estos factores se evalúa la probabilidad de que la estructura resista, durante su vida útil, a los estados límites de servicio, fatiga y fractura, resistencia y sollicitaciones extremas.

Por lo tanto, resulta pertinente revisar el estado de deterioro de los puentes en servicio y evaluar su capacidad portante remanente para poder planear y diseñar estrategias para su conservación, considerando diferentes materiales y nuevas tecnologías para su rehabilitación.

Existen diversos procedimientos de rehabilitación de superestructuras, los cuales se describen brevemente en este trabajo, así como sus ventajas e inconvenientes. En particular se presenta con detalle la revisión de varios de los proyectos tipo publicados por la Secretaría de Asentamientos y Obras Públicas (SAHOP) en 1963, en especial los proyectos de losas con dos nervaduras de concreto reforzado; después de su revisión se presenta el proceso de refuerzo de estos proyectos con elementos laminados de fibras de carbono embebidas en una matriz polimérica.

CAPÍTULO 1

**Técnicas convencionales para el
refuerzo de superestructuras
puentes. Aspectos constructivos**

1.1. Presfuerzo adicional externo

1.1.1. Aspectos generales del presfuerzo adicional externo

Esta técnica es la que más se ha empleado en los puentes carreteros de México; el presfuerzo puede ser aparente, cuando se coloca en las partes exteriores de la superestructura, o no visible cuando se coloca en las partes interiores de la misma, como ocurre en las secciones cajón (*Figura.1.1*). Tanto en los puentes de acero como en los de concreto, el presfuerzo se aplica mediante la acción de una fuerza de compresión en los patines o zonas de tensión de la estructura, que produce en ella un momento flexionante adicional. Esta fuerza de compresión se aplica por medio de torones o barras de acero de alta resistencia o de fibras de carbono, vidrio, o "aramid" embebidas en resinas poliméricas. Se calcula la magnitud de la fuerza de compresión aplicada, así como el material y tamaño de dichos torones, o barras de alta resistencia.

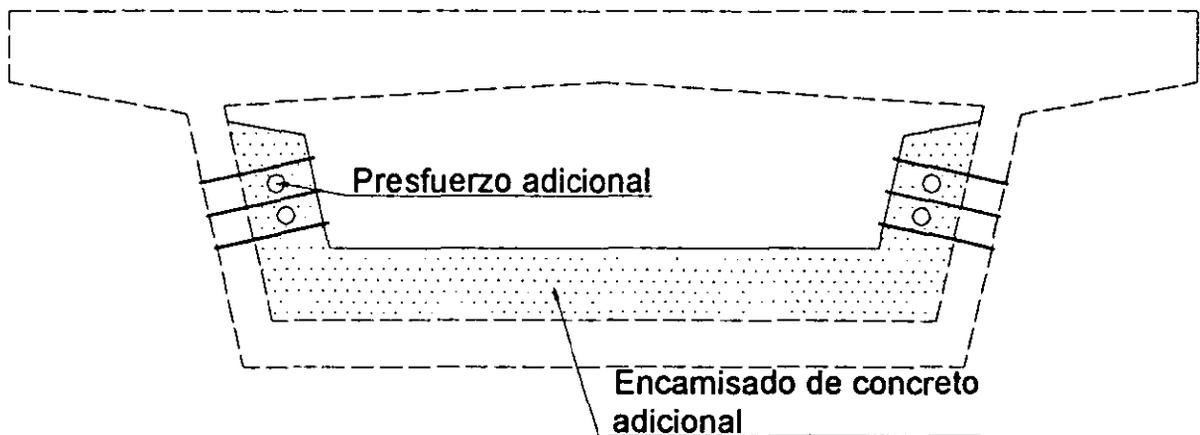


Figura 1.1 Refuerzo mediante presfuerzo adicional en una sección cajón

1.1.2. Configuración del presfuerzo

En el caso más común de las traveses de sección cajón, los cables se instalan en el interior de los cajones, como mencionamos en el punto anterior. Sin embargo no sólo las traveses cajón son susceptibles de refuerzo, también se pueden reforzar mediante el presfuerzo externo las losas nervuradas, macizas, aligeradas, etc. En este sentido existen dos posibilidades de configuración: la configuración rectilínea y la poligonal (*figura 1.2*). La primera ofrece las ventajas de simplicidad y de no inducir pérdidas por fricción. Sin embargo, su rendimiento es mediocre, sobre todo en tableros de sección constante, ya que cualquier descentramiento de la configuración resulta prácticamente anulado por los momentos hiperestáticos del presfuerzo. La segunda requiere forzosamente de bloques desviadores, los que también ayudan a mejorar el rendimiento del presfuerzo. Además en la parte donde el cable se inclina, se aprovecha la componente vertical de la fuerza de presfuerzo, como refuerzo contra el esfuerzo cortante. Un inconveniente es que se pierde por fricción una parte del presfuerzo a través de los desviadores; por lo tanto hay que tratar específicamente cada caso.



Figura 1.2. Configuración poligonal

1.1.3. Instalación del presfuerzo adicional

Una vez definidos el valor y la configuración del presfuerzo, se procede a instalarlo en la superestructura del puente y dependiendo si este es de concepción antigua y por ende no admite cables o fuerzas adicionales, se procede a la colocación de anclajes.

Los anclajes

La función de estos dispositivos es la de evitar el deslizamiento de los cables de presfuerzo, con el fin de mantener la tensión o fuerza de los mismos a lo largo de la vida útil del presfuerzo. A continuación se describen dos soluciones de anclaje.

a) Anclajes en los extremos de los tableros o superestructuras

Esta técnica consiste en construir en los extremos del tablero vigas o bloques transversales de gran masa destinadas a recibir el anclaje de los cables (*Figura 1.3*), así se reparte el esfuerzo adicional en la estructura. Sin embargo, la realización de los trabajos de construcción obliga a la destrucción de parte del estribo, además de interrumpir la circulación del tránsito, lo que puede constituir una molestia difícilmente tolerable.

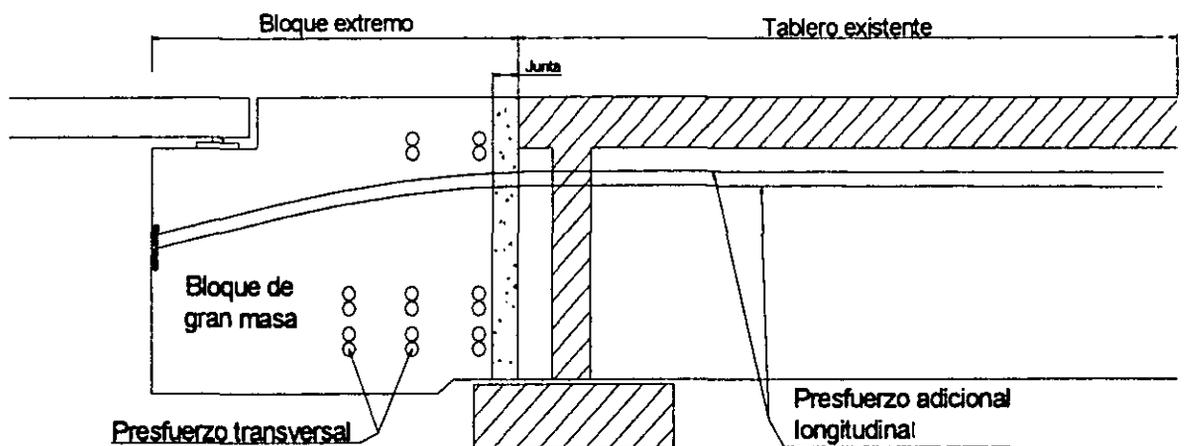


Figura 1.3. Anclaje en el extremo del tablero (elevación)

b) Anclaje por losas postizas

Esta técnica consiste en fijar sobre la estructura, mediante presfuerzo transversal, una losa postiza de concreto o una plancha de acero (*Figura 1.4*); esta losa recibe los anclajes de los cables y permite transmitir los esfuerzos del cable a la estructura.

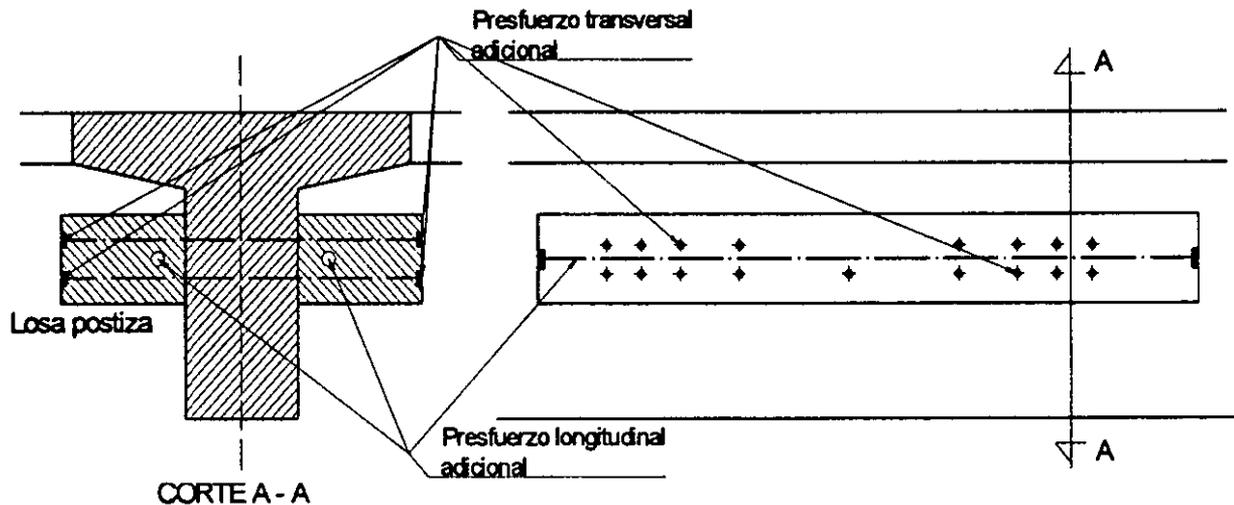


Figura 1.4. Anclaje por losa postiza

La operación de sujetar la losa postiza a la estructura existente es particularmente delicada. Los puntos que hay que vigilar son:

- El valor de la fuerza de sujeción; esta depende de la naturaleza del plano de fricción entre el postizo y la estructura. En el caso más favorable, es decir, cuando el postizo se une, la relación entre la fuerza de sujeción y la fuerza longitudinal del anclaje debe estar entre 1.5 y 2. En el caso más crítico, la sujeción de un postizo metálico puede llegar hasta 4. (*Del Pozo Frutos, 1991*)

- El valor efectivo de esta fuerza de sujeción; una vez puesto en tensión el presfuerzo transversal, mediante elementos muy cortos (del orden de un metro), si no se toman ciertas precauciones el valor de la fuerza puede bajar en 20 ó 30%. Se considera que para obtener la fuerza de sujeción deseada es necesario realizar dos o tres tensados sucesivos, realizando el último después de varios días para reducir la pérdida debida a la fluencia local del concreto bajo los anclajes.
- La perforación de la estructura existente; esta labor es necesaria para instalar las barras de sujeción. Con frecuencia se trabaja en zonas por donde ya existen cables de presfuerzo y cuya posición no se conoce con certeza. Por lo tanto, el medio más seguro de efectuar dicha perforación es realizar una exploración gammagráfica en las zonas para conocer la posición real de los cables de la estructura.
- Los efectos locales sobre la estructura existente; se introducen, por una parte, efectos de difusión y de arrastre debidos al presfuerzo de la estructura y, por otra parte, flexiones locales cuando no se colocan postizos en ambas partes del alma (el caso más frecuente). De tal suerte que deben verificarse estos efectos locales y prever dispositivos de refuerzo en el caso que fuera necesario.

Los desviadores

Los esfuerzos a los que están sujetos estos dispositivos son mucho menores que en los anclajes, así como las dificultades técnicas a las que están sujetos. Un detalle importante consiste en disponer en el desviador un tubo metálico rígido con una curvatura tal que permita el paso del cable y su canalización a través del desviador, asegurando el correcto reparto de las presiones de contacto. El desviador fijo (*Figura 1.5*); como con los postizos de anclaje, se fija a la estructura existente una pieza de concreto o de acero que contenga el tubo para que pase el cable. Las precauciones que se deben tomar en

esta operación de fijación son las mismas que con los postizos de anclaje, aunque los refuerzos para la sujeción son mucho más débiles.

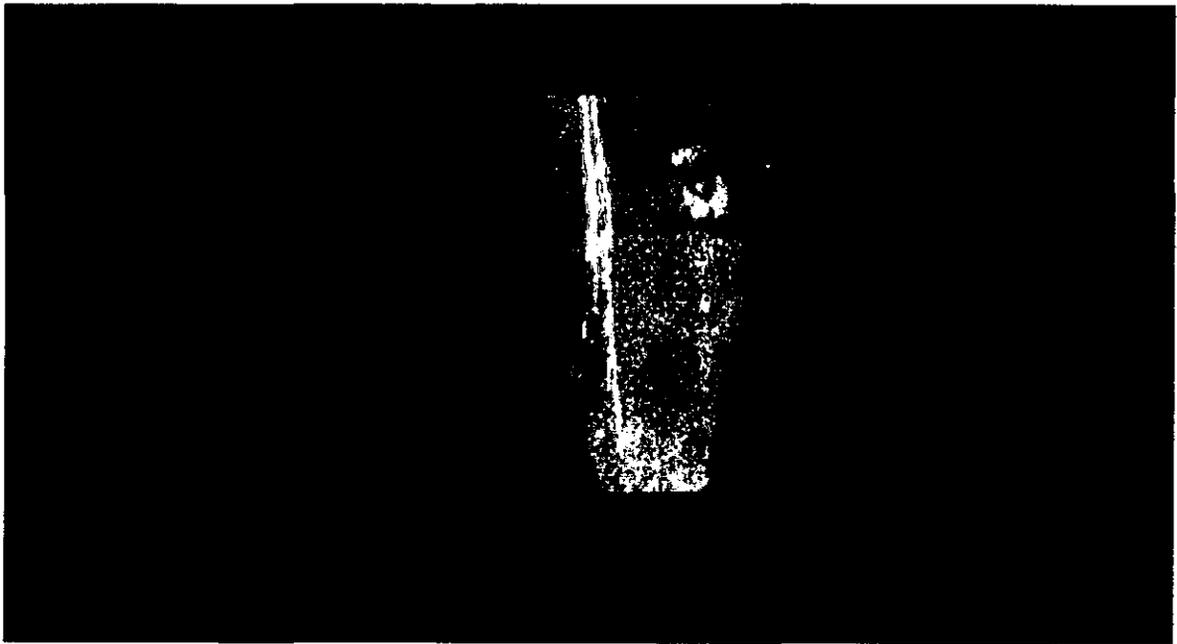


Figura 1.5. Desviador fijo

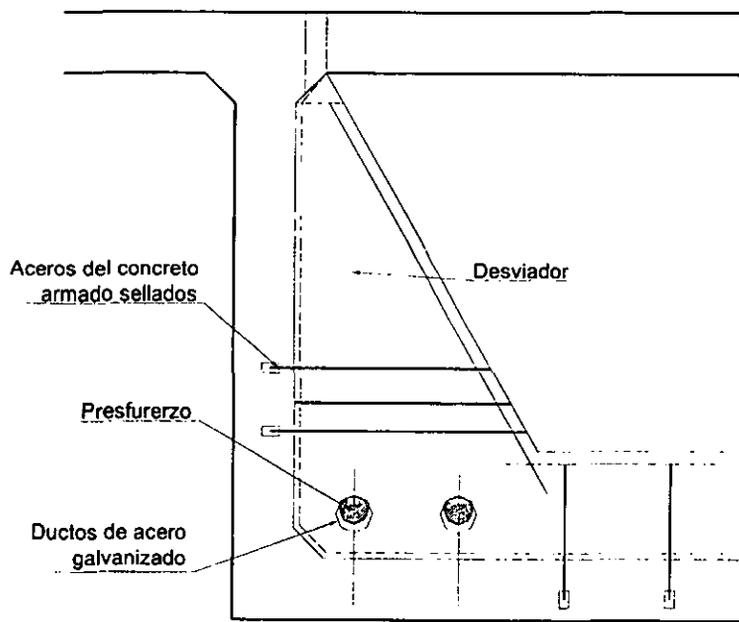


Figura 1.6. Esquema de un desviador fijo (corte)

b) Los codales adicionales

Para no generar concentraciones de esfuerzos demasiado localizados es posible colocar codales adicionales dentro de las trabes de sección cajón. Estos codales se unen a la estructura existente y contienen los tubos curvos para recibir cables adicionales.

1.1.4. Inyección de fisuras

El papel mecánico de las inyecciones es importante: se trata de restablecer el monolitismo del concreto de tal modo que las fuerzas de compresión que se quieren inducir en la fibra inferior, mediante el presfuerzo adicional, se puedan alcanzar desde el principio de la puesta en tensión. Si no se tiene esta precaución, una parte del presfuerzo adicional se pierde en cerrar más o menos las fisuras que no hayan sido inyectadas correctamente, lo que no es útil una vez que ya se ha realizado el cierre de las mismas.

El procedimiento habitual de inyección, consiste en cargar el tablero o superestructura para abrir las fisuras, se inyectan con resinas y después se polimerizan para finalmente descargar el tablero. Cuando se ejecuta bien esta operación al retirar la carga se induce una primera recompresión. La operación de la recompresión consiste en destensar los cables adicionales, en caso que los haya, cargar el puente, inyectar las juntas abiertas, descargar el puente y volver a poner en tensión los cables. Se ha podido comprobar que con este procedimiento se logra una eficiencia total del presfuerzo adicional.

1.1.5. Protección de cables adicionales

Para estos efectos se consideran diversas soluciones:

1. Cables galvanizados desnudos. Su inspección se puede hacer visualmente. Para su uso se sugiere prever la colocación de varillas

intermedias de sujeción al concreto. Esto aumentará la seguridad del personal durante los trabajos de inspección.

2. Ductos rellenos de un producto protector. Los ductos suelen ser de polietileno de alta densidad y se rellenan regularmente con un mortero o cemento clásico. No obstante, en ocasiones se han utilizado grasas inyectadas en caliente (de 70 a 80° C) las que no han sido del todo satisfactorias, ya que a mediano plazo se presentan derrames.
3. Monotorones enfundados - protegidos. El empleo de estas protecciones tienen la ventaja de que se pueden tensar los torones uno a uno mediante un gato ligero. Sin embargo el disponer de gatos de gran tamaño en el interior de las estructuras puede resultar extremadamente difícil. Otra ventaja es que las pérdidas por rozamiento al poner en tensión el presfuerzo, son bajas, pero no hay que perder de vista una dificultad importante en las zonas de curvatura. En estas zonas las capas superiores de los monotorones se apoyan en las capas del interior de la curva y provocan desgarraduras inadmisibles de las fundas. Sin embargo, se han encontrado dos soluciones para este inconveniente:
 - a) Separar los monotorones a todo lo largo del trayecto pasándolos por tubos metálicos individuales cimbrados hacia los desviadores formando un haz con el conjunto de tubos.
 - b) Colocar los monotorones dentro de un conducto de polietileno de alta densidad; se inyecta mortero de cemento en el vacío que queda entre los monotorones y el conducto, salvo en los anclajes. La puesta en tensión se realiza después que ha fraguado el mortero, estando entonces cada torón definitivamente fijo en su lugar. (La protección se consigue por la inyección local de los anclajes).

1.1.6. Ensayos de verificación

Es importante asegurar que la colocación de presfuerzo adicional responda bien al objetivo señalado, además se debe verificar que no existan aberturas de juntas o grietas ya polimerizadas con el tránsito, ni con el gradiente térmico. Por otra parte los aceros de los tendones deben pasar las pruebas normalizadas de baja susceptibilidad a la fragilización por hidrógeno, y debe garantizarse la protección de estos tendones a la corrosión. Cabe mencionar que es recomendable llevar a cabo campañas periódicas de instrumentación de la obra habitualmente, ya que la comparación directa de los resultados antes y después de la reparación permite conocer la eficacia del refuerzo.

1.2. Placas de acero adheridas

La colocación de placas adheridas de acero es otra técnica que se utiliza para proveer de refuerzo adicional a una estructura. El éxito de la técnica estriba en gran medida en las propiedades físicas del material utilizado para ligar este nuevo refuerzo; las resinas epóxicas se utilizan más frecuentemente como el elemento de liga entre el refuerzo y la estructura (Henwood A..M. y O'Connell K.J., 1994), no obstante la gran variación entre los diferentes tipos de epóxicos que se utilizan. Los pioneros de esta técnica se ubicaron simultáneamente en Francia y Sudáfrica en los años 1960's, y en un principio utilizaban placas de acero templado que aún en la actualidad están en uso.

1.2.1. Alcances de la técnica

La utilización de ésta técnica aunada a pruebas complementarias de la resina epóxica que funge como agente adhesivo, permite a la estructura:

- a) Reducir la deflección y por lo tanto reducir la fisuración
- b) Incrementar la capacidad de carga
- c) Incrementar la resistencia a la flexión (*Figura 1.8*)
- d) En ciertos casos mejorar la resistencia a cortante

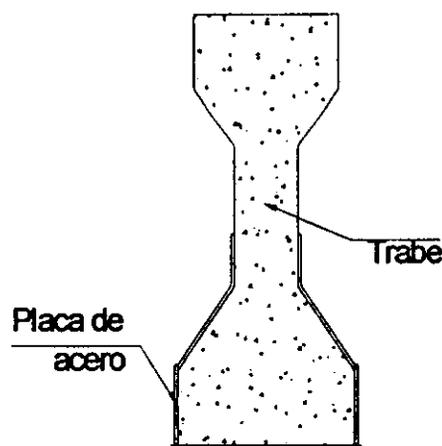


Figura 1.8. Disposición de refuerzo mediante placas de acero adheridas

1.2.2. Diseño

1.2.2.1 Principios básicos

El concepto fundamental es que el adhesivo liga la placa de acero a la estructura por reforzar para que actúe como una sección compuesta y permita de esta forma la transmisión de cargas. El principio de superposición deberá ser aplicado para determinar los esfuerzos finales que deberán ser revisados contra los límites de servicio. También se deberá revisar y calcular el momento último de resistencia de la sección reforzada y se deberá garantizar que la sección no quede sobre-reforzada.

1.2.2.2 Diseño de placas de refuerzo

Las placas tendrán como mínimo 6 mm de espesor y 360 mm de ancho, quedando el largo a criterio del fabricante y de la capacidad y recursos constructivos con los que se cuenten. Estas placas contarán además con hileras de agujeros para colocar pernos, espaciados a cada 100 mm de centro a centro.

1.2.2.3 Diseño de pernos

En este tipo de refuerzo se ha descubierto que las concentraciones de esfuerzos de cortante y los desprendimientos ocurren en las orillas de las placas, razón por la cual se requieren pernos de anclaje para que resistan al menos tres veces el esfuerzo cortante longitudinal.

No existe guía alguna para el diseño de estos pernos, sin embargo la literatura proporcionada por los fabricantes de estos mismos proporciona información confiable sobre las cargas a tensión y a cortante. De hecho no existe una recomendación disponible acerca del diámetro del agujero en la placa que

garantice la transferencia de esfuerzos cortantes de la placa a los pernos. Existe mucha incertidumbre acerca del comportamiento de la conexión placa – perno. Esto indica claramente que se necesita de una intensa investigación para definir la proporción en que son transferidos los esfuerzos (Henwood A. M., O'Connell K.J., 1993).

1.2.3 Adhesivo. Pruebas y propiedades

Como ya se ha mencionado el adhesivo es la "clave" del éxito de la técnica del refuerzo con placas de acero adheridas, ya que permite la transferencia de esfuerzos al nuevo refuerzo colocado. Se han centrado en esta área diversos desarrollos e investigaciones y se ha encontrado que los adhesivos de resinas epóxicas, son los más apropiados para efectuar la correcta liga entre el material base y el refuerzo. Uno de los factores que pueden afectar el trabajo de liga del refuerzo es la humedad, ya que algunas resinas epóxicas tienen altos índices de absorción de esta. En este sentido, la absorción de agua es un factor que afecta a largo plazo el comportamiento y durabilidad del adhesivo, muy especialmente el factor de deslizamiento; la humedad crea un ambiente propicio para el desarrollo de la corrosión. Relacionado con este efecto; diversas investigaciones han demostrado a que el adhesivo thixotrópico, con altos porcentajes de polyamidas, tiene una buena resistencia a la absorción de la humedad.

Por otra parte, conviene realizar pruebas para medir las características de propagación de fisuras y al mismo tiempo descubrir debilidades en la liga, causadas por la corrosión. Con los resultados de las pruebas se puede no tan sólo revisar que el adhesivo absorba bajas cantidades de humedad, sino también diseñar una protección con un alto rendimiento contra la corrosión del acero. Esta protección se logra incorporando un "primer" epóxico como parte de la protección del sistema.

A continuación se presentan algunos de los requerimientos (Calder A. J J, 1992), para los adhesivos utilizados en el refuerzo de puentes, en el Reino Unido:

- Tener 2 componentes de diferente color para facilitar el correcto mezclado del adhesivo
- Tener una mezcla consistente para expandirla horizontal y verticalmente en toda la superficie.
- Poder aplicar de 1 a 10 mm las capas de espesor que permitan corregir irregularidades en la superficie del concreto.
- Tener una fecha de caducidad por bote de adhesivo.
- Curado entre 10° C y 30° C
- Tener la mínima contracción en el curado.
- Adherir correctamente el acero al concreto.
- Ser tan resistente como el concreto en lo que se refiere al esfuerzo cortante: tendrá que tener una resistencia al esfuerzo cortante más grande que 8 N/mm², incluyendo el factor de seguridad.
- Ser lo suficientemente rígidos para no presentar deslizamientos significativos bajo cargas sostenidas; también ser lo suficientemente flexibles para que no puedan originarse concentraciones de esfuerzos debido a desplazamientos en la orilla de las placas. La magnitud del módulo de flexión deberá estar entre 2 y 8 GN/m².
- Tener una durabilidad a largo plazo, así como una resistencia a la humedad. Durante el servicio deberá tener una vida útil de 30 años para las aplicaciones de reparación y refuerzo.

1.2.4 Preparación de superficie por reforzar

El éxito de esta técnica no tan sólo recae en lo mencionado en el inciso anterior, sino también en la correcta supervisión de la colocación de las placas y en la destreza del equipo de trabajo (*M. Shaw 1993*). De cualquier forma, para poder llevar a cabo una exitosa puesta en operación, se recomienda que especialistas con experiencia puedan supervisar exhaustivamente la correcta colocación de las placas de acero sobre la estructura, de manera que esta y el refuerzo trabajen como una sola unidad.

En el campo de la Ingeniería Civil, esta técnica es más utilizada para rehabilitar estructuras de concreto por medio de la unión de placas de acero a superficies que están sujetas a esfuerzos de tensión o expuestas a grandes esfuerzos de cortante. En este sentido es necesario garantizar no sólo que se sigan al pie de la letra las recomendaciones sugeridas anteriormente, sino que se tenga una buena preparación del material base que será reforzado.

1.2.4.1 Superficies de acero

Deberá asegurarse de la completa remoción de óxido, polvo, suciedad, etc. Esta se realiza por medio de un chiflón o chorro de arena. Existen otros métodos de abrasión mecánica, tales como la utilización de cepillos de metal o esmeril, sin embargo, estas herramientas no son aceptadas, ya que tienden a pulir las capas de óxido en vez de removerlas.

Para poder prevenir la reoxidación de la superficie esta debe ser cubierta primero con un "primer" a 4 horas de haber aplicado a la placa el chorro de arena. Posteriormente de la aplicación del "primer" o primario, las placas deberán desgrasarse en caso de que existan aceites o grasas y aspirarse para remover cualquier partícula de polvo.

El "primer" deberá ser aplicado hasta lograr una película seca de un espesor aproximado de entre 50 y 75 micras, y deberá dejarse reposar completamente. En los procesos subsecuentes, los operadores deberán manejar las placas con guantes, además de que tendrán una cubierta protectora para su transportación; esto es necesario para no afectar las características del material en el momento de instalarse en el sitio

1.2.4.2 Superficies de concreto

La superficie de concreto deberá ser limpiada de cualquier material contaminante como residuos de cemento, materia orgánica, aceite, mugre, etc. Este tipo de limpieza también puede realizarse mediante chorros de arena.

En la inspección previa a la instalación de las placas se determinará qué áreas se encuentran dañadas o con oquedades excesivas y se definirá cuáles de estas requieren una preparación o reparación adicional. Este tipo de reparaciones incluye la inyección de fisuras y rellenos con mortero de alta resistencia.

Inmediatamente después de la aplicación del adhesivo tixotrópico, las superficies del concreto se aspiran para remover cualquier partícula de polvo.

1.2.5 Aplicación del adhesivo

Existen dos métodos de aplicación: el de "inyección" y el "esparcido." El método de "esparcido" es el que mayor aceptación ha tenido en Europa, ya que ha sido utilizado y probado a lo largo de un periodo bastante grande y se ha observado que es fácil de colocar reduciendo considerablemente errores en su aplicación. El de "inyección" consiste en aplicar el adhesivo entre la superficie y las placas, ya colocadas con anterioridad mediante pernos. Sin embargo este método no ha demostrado ser eficiente en cuanto a la colocación uniforme del adhesivo, independientemente de lo complicado que es su aplicación en campo.

En el mercado de las resinas, existe un producto llamado SIKADUR 31 (Hutchinson, A.R. 1986), el cual posee las mejores características en lo que se refiere a baja capacidad de absorción de la humedad, así como diferentes ventajas en cuanto a su capacidad de transferencia de esfuerzos de la estructura a las placas de acero. El SIKADUR 31 está formado por dos componentes de colores blanco y negro; son fáciles de mezclar para lograr una consistencia uniforme, cuyo indicador, en este caso es que la mezcla presente un color gris tenue.

Después de realizar una mezcla satisfactoria de los componentes, el adhesivo estará listo para poderse aplicar a las superficies de acero a concreto. Esta aplicación, normalmente consiste de aproximadamente 1 mm de espesor en las placas de acero y 2 mm de espesor en el concreto.

Durante la operación de pegado, el operador deberá asegurarse del completo contacto del adhesivo a las superficies que pretende ligar. Una vez pegada la placa se asegura con remaches o pernos adicionales. La utilización de estos objetos responden a la necesidad de resistir las fuerzas de deslizamiento en la terminación de las placas (juntas). El tiempo de curado resulta variable, una vez curado el adhesivo los esfuerzos se transferirán a las placas de acero de refuerzo.

Una vez instalado el refuerzo, se recomienda efectuar pruebas para asegurarse del correcto trabajo de los operadores. Este tipo de pruebas es recomendable realizarlas en laboratorios independientes, para garantizar que las especificaciones requeridas de mezcla, aplicación y desempeño sean las correctas.

Por otro lado también es recomendable proteger las partes de refuerzo que queden expuestas a la intemperie, esto para evitar la corrosión. Esta protección puede ser cubierta por algún compuesto químico que incluso pudiese servir para darle un acabado estético al refuerzo.

1.2.6 Control de calidad

Para estos trabajos resulta imprescindible definir los detalles para diferentes procedimientos de prueba y así garantizar la correcta colocación de las placas de acero y que el epóxico esté funcionando. En este sentido se hace necesario monitorear y realizar pruebas a este refuerzo por diferentes laboratorios. (*Calder, A.J.J. 1988*). De igual manera, es necesario proteger las láminas de acero del medio ambiente. De hecho existen pinturas que protegen a estas placas de refuerzo y además propician una apariencia estética aceptable.

CAPÍTULO 2

Refuerzo de superestructuras de puentes mediante elementos laminados de fibras de carbono.

Hasta la fecha esta técnica de refuerzo no ha sido muy utilizada en México, de hecho, sólo en una oportunidad ha podido ser probada. En contraste, en Japón, entre abril de 1992 y mayo de 1995 se han rehabilitado 73 puentes, mientras en la tecnología aeroespacial y en la industria manufacturera se les ha empleado desde hace más de 25 años. Las fibras de carbono son de peso reducido, alta resistencia a la tensión y resistencia a la corrosión, tienen además baja relajación y elongación; comparadas con el acero son mucho más ligeras, mucho más delgadas y tienen una capacidad resistente a la tensión diez veces superior. Básicamente este tipo de refuerzo consiste en un sistema externo de fibras unidireccionales embebidas en una matriz epóxica que se adhiere a la superficie de las estructuras, formando un conjunto estructural similar a como lo hacen las placas de acero, pero con una altísima relación resistencia - espesor, con gran durabilidad y con una gran flexibilidad para la rehabilitación. Esta técnica resulta económicamente más atractiva que las técnicas tradicionales. En la *tabla 2.1* se presentan las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de elementos laminados de fibras de carbono que existen en el mercado.

ELEMENTOS LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO		
FIBRA	CARBONO DE ALTA RESISTENCIA A LA TENSION	CARBONO DE ALTO MÓDULO ELASTICO
DENSIDAD, g/cm ³	1.82	1.82
PESO POR AREA, g/m ²	200	300
ANCHO DE LAMINA, cm	50	50
RESISTENCIA A LA RUPTURA, kg/cm ²	43 578	41 050
ESPESOR DE DISEÑO, cm/lámina	0.0165	0.0165
RESISTENCIA DE DISEÑO, kg/cm ²	35 500	30 000
MODULO ELASTICO, kg/cm ²	2.35E6	3.80E6
ELONGACIÓN ÚLTIMA, %	1.5	0.8

Tabla 2.1. Propiedades de los elementos laminados de fibras de carbono

2.1 Proceso de aplicación de los elementos laminados de fibras de carbono de carbono

El proceso normal de aplicación se muestra en la figura 2.1.

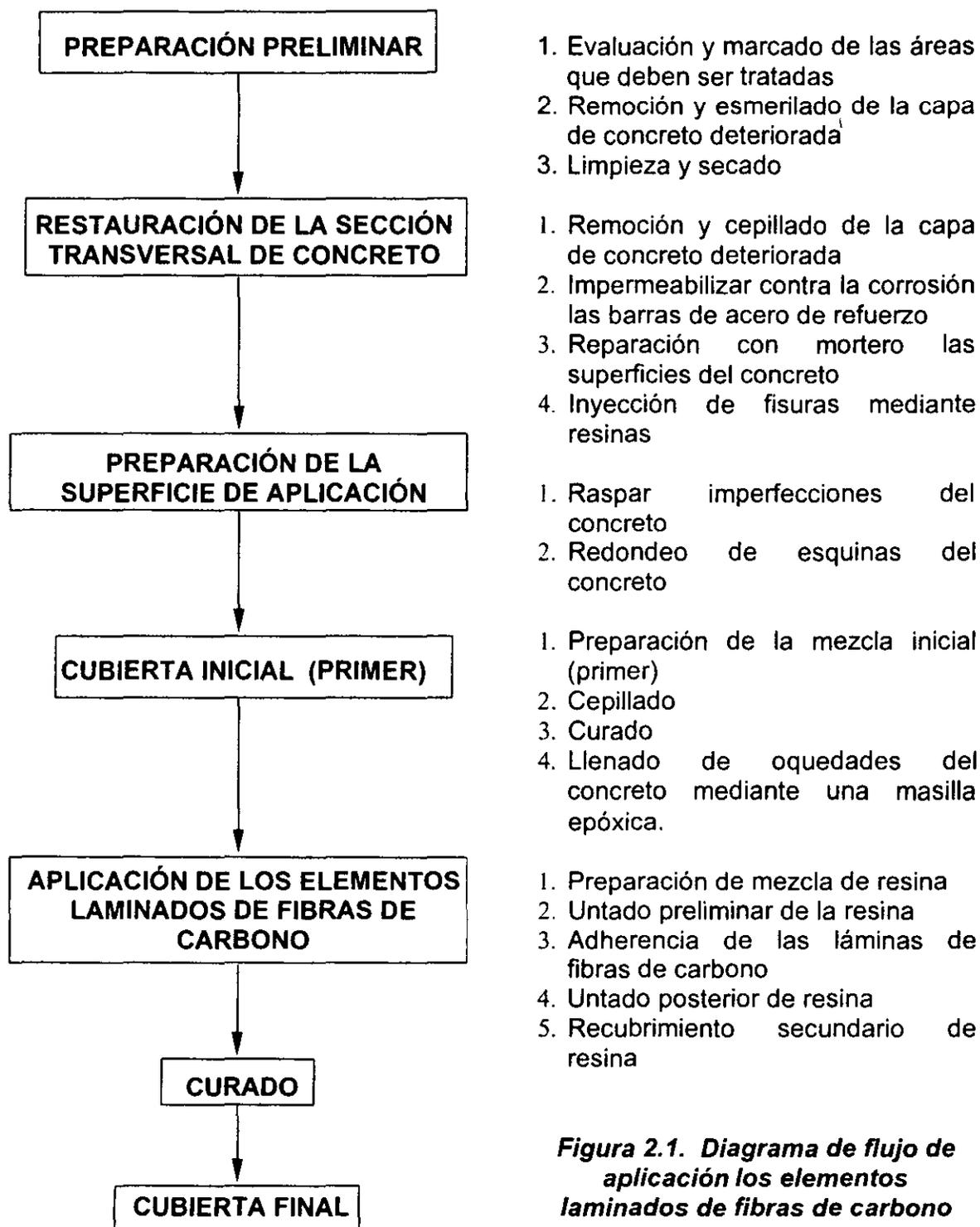


Figura 2.1. Diagrama de flujo de aplicación los elementos laminados de fibras de carbono

2.2 Notas preliminares de aplicación

Temperatura ambiente

Es posible que el "primer" y la resina en una temperatura ambiente baja puedan desarrollar una alta viscosidad y/o un grado de curado lento. Las condiciones para llevar a cabo la aplicación de los laminados de fibras de carbono deben ser evaluadas minuciosamente, en especial en aquellos lugares en que se destacan por tener condiciones ambientales extremas. No se deberá aplicar los laminados de fibras de carbono cuando la temperatura ambiente sea menor de 5°C.

Condensación del rocío

La presencia de humedad puede inhibir la adherencia del "primer" y/o la resina. Si en determinado caso existiesen goteras o infiltrado de agua, esta deberá ser tapada y el agua drenada fuera de la zona de aplicación. Tampoco se podrán aplicar las láminas cuando haya llovido con anterioridad y exista condensación de el agua de lluvia.

Defectos en la superficie del concreto

Las irregularidades del concreto y/o esquinas afiladas dentro de la sección a reforzar, pueden ser perjudiciales y propiciar la separación y delaminación de las láminas de carbono. En este sentido se recomienda que las irregularidades en el concreto deban ser niveladas y suavizadas. En lo que respecta a las esquinas afiladas, estas deberán ser redondeadas a un radio de al menos 10 mm.

Manejo del primer y la resina

La viscosidad del "primer" y la resina puede ser ajustada por medio de calor. Sin embargo, no se recomienda diluir el primer y la resina utilizando solventes orgánicos. Después que la resina ha sido mezclada, ésta deberá de utilizarse, sin pasarse del tiempo de expiración, de lo contrario se incrementaría la viscosidad y no se garantizaría el debido adherido de los laminados.

Manejo de los laminados de fibras de carbono

El manejo de los elementos laminados de fibras de carbono no deberá ser rudo, los laminados deberán ser almacenados y enrollados con radio máximo de 300 mm, (*Figura 2.2*). Cuando se tengan que adherir láminas de diferentes longitudes a una superficie de concreto, se recomienda no tener un traslape menor de 100 mm para ser aplicadas en una dirección longitudinal. Tratándose de una sección lateral, no es necesario el traslape.



Figura 2.2. Disposición de las fibras de carbono durante su almacenaje

Programa de aplicación

Dependiendo de las circunstancias del sitio de trabajo, es posible que existan ciertas limitaciones con respecto a la disponibilidad de los materiales, herramientas y andamios. El proceso de aplicación puede ser afectado por la vibración u otros factores. De cualquier forma se recomienda que se realice una visita previa al sitio de trabajo y que también se haga una planeación de las actividades a realizar, para garantizar buenos resultados.

2.3 Pasos para la aplicación

2.3.1 Preparación preliminar

1. La superficie deteriorada del concreto (capas dañadas por el ambiente, excedentes de concreto, lubricantes, pintura, etc) deberá ser removida y nivelada con chorro de arena (*sandblasteo*).
2. El polvo generado por la limpieza y nivelado de la superficie podrá removersse mediante aire a presión. Si el polvo ha sido removido por medio de un lavado con agua, la superficie, tendrá que ser secada.

2.3.2 Restauración de la sección transversal de concreto

1. Defectos en el concreto base tales como desprendimiento de material, oquedades, corrosión , etc., deberán ser reparados y removidos. Si las barras de refuerzo están expuestas a la intemperie y existe corrosión en dichas barras, antes de restaurar el concreto se deberá aplicar una solución contra la oxidación. La restauración del concreto será con un mortero a base de resina epóxica o con un mortero polimérico de tal forma que se iguale o exceda la resistencia del concreto original.
2. Para el inyectado de fisuras se deberá utilizar alguna resina epóxica o algún material similar, (*Figura 2.3*).



Figura 2.3. Vista parcial de tablero de un puente, en el cual fueron inyectadas las fisuras mediante resinas epóxicas

3. Si a través de las fisuras o juntas, se observa el paso del agua, se recomienda impermeabilizar antes de efectuar la restauración del concreto.

2.3.3 Corrección de defectos en la superficie del concreto

Para la aplicación de las láminas de fibras de carbono, las diferencias entre las superficies del concreto, no deberán exceder de 1 mm.

1. Las oquedades en el concreto tales como pequeñas protuberancias deberán ser niveladas mediante discos, (*Figura 2.4*). Las depresiones en la superficie del concreto tales como juntas, deberán ser rellenadas; mediante una masilla de resina epóxica o mortero.
2. Las esquinas afiladas deberán ser redondeadas, el radio de redondeo no deberá ser menor que 10 mm.



Figura 2.4. Nivelación de oquedades mediante discos

2.3.4 Aplicación de la cubierta inicial (primer)

- No se deben colocar ninguna cubierta de primer si la temperatura ambiente es menor que 5°C, o si está lloviendo en el momento de la aplicación o existe condensación de agua de lluvia. Para poder seleccionar la clase de “primer” adecuado para cada caso, se deberá tomar nota de la temperatura imperante antes de aplicar el “primer”.
- El sitio de trabajo deberá estar perfectamente ventilado. El utilizar fuego está estrictamente prohibido, ya que el “primer” contiene solventes orgánicos. A este respecto, también es recomendable prevenir la inhalación de estos compuestos. Por lo anterior, en todo momento de la aplicación del “primer” se recomienda

hacer uso de cierta indumentaria de trabajo tal como: mascararas, goggles o lentes y guantes de goma.

1. El "primer" deberá ser mezclado perfectamente, alrededor de 2 minutos en una mezcladora eléctrica, hasta llegar a una consistencia uniforme. El volumen del "primer" a preparar deberá encontrarse dentro del tiempo trabajable de la mezcla, ya que de lo contrario no llegará a formar una capa preliminar adecuada para la colocación de la resina y poder adherir posteriormente los laminados. El tiempo de vida por lote puede variar de acuerdo a la temperatura. En las *tablas 2.2 y 2.3* se muestran las propiedades del "primer", así como las distintas temperaturas de aplicación dependiendo de las condiciones que imperen en el sitio.
2. La mezcla del primer deberá ser aplicada con un rodillo (*Figura 2.5*). Si existiese la necesidad de aplicar una segunda capa, se puede hacer siempre y cuando la primera capa haya penetrado al concreto. El volumen de aplicación variará de acuerdo con la porosidad o aspereza de la superficie del concreto.



Figura 2.5. Aplicación del "primer"

Capítulo 2 Refuerzo de superestructuras de puentes mediante elementos laminados de fibras de carbono

3. El curado de la cubierta inicial (primer) durará un mínimo de 3 horas. Una práctica muy común, es permitir que el primer seque durante la noche.
4. Las irregularidades causadas por la aplicación de la capa inicial (primer) deberán ser removidas. Si existiesen pequeñas oquedades se recomienda utilizar una masilla epóxica para corregirlas.

PROPIEDADES DEL PRIMER			
TIPO	ESTANDAR	VERANO	INVIERNO
TEMPERATURA DE APLICACIÓN, °C	15 - 25	25 - 35	5 - 15
TIEMPO DE VIDA POR BOTE, minutos @ 30°C @ 20°C @ 10°C	40	40 120	20
TIEMPO DE APLICACIÓN, horas @ 20°C	10	12	7
PORCION DE MEZCLADO POR PESO (Resina : Hardener) VISCOSIDAD, eps	2 : 1 2 000	2 : 1 2 000	2 : 1 1 300
SOLVENTE	Ninguno	Ninguno	Ninguno

Tabla 2.2 Propiedades del "primer" en función de la temperatura imperante en el sitio de trabajo

PROPIEDADES DEL PRIMER			
GRADOS ESPECIALES	ALTO GRADO DE PENETRACIÓN	SUPERFICIE HUMEDA	
TIPO		STANDARD	INVIERNO
TEMPERATURA DE APLICACIÓN, °C	5 - 35	15 - 25	5 - 15
TIEMPO DE VIDA POR BOTE, minutos @ 30°C @ 20°C @ 10°C	120 120 120	40	20 50
TIEMPO DE APLICACIÓN, horas @20°C	3	12	10
PORCION DE MEZCLADO POR PESO (Resina : Hardener) VISCOSIDAD, eps	1 : 1 90	2 : 1 45 000	2 : 1 45 000
SOLVENTE	Si	Ninguno	Ninguno

Tabla 2.3. Propiedades del "primer" en función de las características de la superficie de aplicación

2.3.5 Pegado de los elementos laminados de fibras de carbono

- Ninguna lámina de carbono deberá ser colocada si la temperatura ambiente es menor que 5°C, o si está lloviendo en el momento de la aplicación o existe condensación de agua de lluvia. Antes de colocar alguna lamina de fibras de carbono se deberá tomar nota de la temperatura imperante y de la humedad de la superficie del concreto para poder seleccionar la clase de resina pertinente para cada caso.
 - El sitio de trabajo deberá estar perfectamente ventilado. El uso de fuego está estrictamente prohibido, ya que la resina desprende compuestos tóxicos que puedan ser inhalados. Por lo anterior se recomienda hacer uso, en todo momento en la aplicación de la resina, de indumentaria de trabajo: mascarar, goggles o lentes y guantes de goma.
1. Los laminados de fibras de carbono se deberán cortar utilizando tijeras y navajas ajustándose a las medidas especificadas. La longitud preferible será menor a 2 m de tal suerte que el número de tramos cortados será igual al número de láminas a colocar una jornada de trabajo, de lo contrario pudiesen maltratarse los laminados.
 2. Se debe asegurar que la cubierta inicial (primer) en la superficie del concreto haya sido perfectamente curada.
 3. La resina se deberá mezclar perfectamente, alrededor de 2 minutos, en una mezcladora eléctrica hasta llegar a una consistencia uniforme. El volumen de resina a preparar deberá estar dentro del tiempo útil de empleo (tiempo de trabajabilidad) que tenga el lote por aplicar, es decir, que se encuentre dentro del tiempo en que la mezcla es óptima para aplicarse, ya que de lo contrario no llegará a formar una liga adecuada para la colocación de las láminas de carbono. El tiempo de trabajabilidad del lote puede variar de acuerdo a la temperatura y al volumen de la resina mezclada, como lo consigna *tabla 2.4*

4. La mezcla de la resina deberá ser aplicada con un rodillo y se garantizará que sea uniformemente esparcida sobre la superficie del concreto. El volumen de aplicación variará de acuerdo con la porosidad o aspereza de la superficie del concreto. Se aplicará más resina en los ángulos internos que en las partes planas del concreto.
5. Los laminados se colocarán donde ya se encuentra aplicada la capa de resina. Después de alisar la superficie con la mano, la superficie de papel se despega el laminado, (*Figura 2.6*). Utilizando un rodillo y una espátula de goma se procederá a pegar perfectamente el laminado a la superficie de concreto. Para ello se pasan longitudinalmente, dos o tres veces de ser necesario, dichas herramientas, tratando de impregnar perfectamente la resina. Para realizar el junteo o traslape de estos laminados en dirección longitudinal, es necesario realizar un traslape de longitud mínima de 10 cm cuando menos; para la dirección lateral no es necesario efectuar ningún traslape.

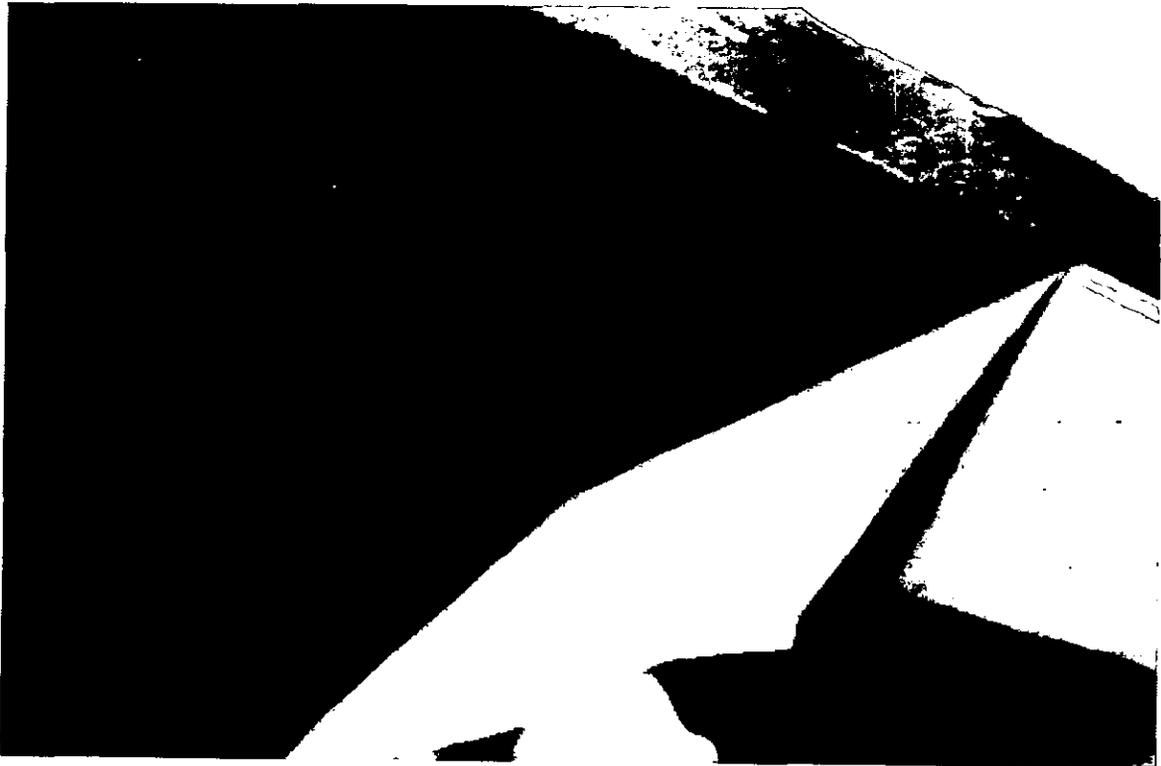


Figura 2.6. Adherido del laminado de fibras de carbono

Capítulo 2 Refuerzo de superestructuras de puentes mediante elementos laminados de fibras de carbono

6. De no ser necesaria ninguna corrección del laminado debida a alguna dislocación, el laminado deberá dejarse reposar al menos 30 minutos; dicha corrección se realizará presionando hacia abajo, o utilizando un rodillo o una espátula.
7. Se procede a aplicar una segunda capa de resina y siguiendo los pasos anteriores (4, 5 y 6).
8. En el caso de requerir más de un laminado se repetirá el proceso desde los pasos 4, 5, 6 y 7.

PROPIEDADES DE LA RESINA			
TIPO	ALTO GRADO DE PENETRACIÓN	ESTANDARD	INVIERNO
TEMPERATURA DE APLICACIÓN, °C	15 - 25	15 - 35	5 - 15
TIEMPO DE VIDA POR BOTE, minutos @ 30°C @ 20°C @ 10°C	40	40 110	20 50
TIEMPO DE APLICACIÓN, horas @ 30°C @ 20°C @ 10°C	10	7 12	7 12
PORCIÓN DE MEZCLADO POR PESO (Resina : Hardener) VISCOSIDAD, cps	2 : 1 20 000	2 : 1 20 000	2 : 1 10 000

Tabla 2.4. Propiedades de la resina, en función de las características de la temperatura y superficie de aplicación

2.3.6 Control de calidad e inspección

1. Después de la colocación de los laminados, se procede a efectuar una inspección. Para evaluar la calidad de la aplicación, se efectúan pruebas a tensión, así como una prueba de la composición de la resina (pruebas de viscosidad).
2. Se elaborará un reporte de supervisión

3. La frecuencia de prueba será una prueba de tensión por cada 2000 m² o una por cada aplicación efectuada. De cualquier forma si el volumen de laminados es menor que 500 m², la inspección puede ser pasada por alto

Control en el proceso de obra

Un inspector certificado deberá verificar en el sitio todos los aspectos de la calidad del material así como su aplicación, incluyendo la preparación de la superficie, el correcto mezclado de la resina, la aplicación del primer, resina y laminados, el curado del compuesto y la aplicación de las capas protectoras.

Protección

- Para protección contra la lluvia, arena, polvo, etc, deberá utilizarse capas protectoras u otras barreras, como plásticos, lonas etc.
1. Después de completar la secuencia de colocado de los laminados, el trabajo deberá protegerse contra la lluvia utilizando hojas plásticas. Se evitará que las hojas protectoras entren en contacto con la superficie del laminado de fibras de carbono.
 2. El curado de los laminados de fibras de carbono no deberá ser menor que 24 horas.
 3. Los siguientes tiempos de curado son los que se requieren para alcanzar su resistencia máxima del laminado:
 - Dos semanas de curado a una temperatura de 10°C promedio
 - Una semana de curado a una temperatura de 20°C promedio

2.3.7 Cubierta Final

1. La cubierta final de los laminados deberá ser aplicada encima de éstos(*Figura 2.7*). Los laminados de fibras de carbono tienen la virtud de que por si mismos

son capaces de prevenir su deterioro de la resina mediante la interrupción de los rayos ultravioleta. De cualquier forma, es preferible aplicar una capa de pintura resistente al medio ambiente; en los casos en que la superficie de concreto se encuentre expuesta directamente a los rayos solares se recomienda aplicar un sistema de pintura a base de uretano.

2. La colocación de la pintura podrá hacerse después del tiempo de curado de la resina.
3. La aplicación de la cubierta final deberá completarse de acuerdo con las especificaciones para cada tipo de pintura.

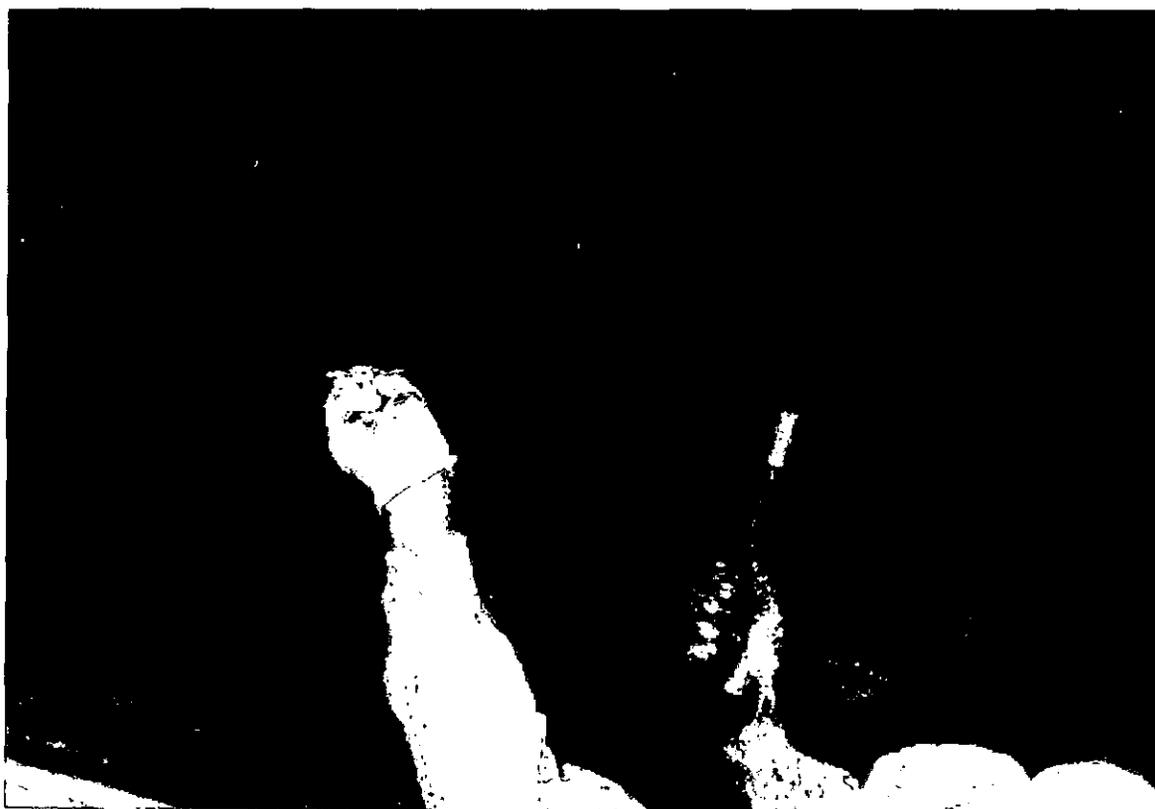


Figura 2.7. Cubierta final

2.4 Control de calidad e inspección

2.4.1 Control de calidad del material

1. Como ya se dijo anteriormente deberá llevarse a cabo una inspección con el objetivo de verificar la calidad de los materiales con respecto a pruebas a tensión a los elementos laminados de fibras de carbono, así como una prueba de la consistencia de la resina como son las pruebas de viscosidad y duración de vida del lote de resinas.
2. Deberá prepararse un reporte sobre el punto anterior
3. La frecuencia de la inspección será de una por cada 2,000 m², o una por cada aplicación. De cualquier forma si la aplicación de la fibras de carbono es menor que 5,000 m², puede desistirse de hacerla.

2.4.2 Control de calidad en el proceso

Como se mencionó, un inspector certificado verificará todos los aspectos de aplicación y preparación del material, incluyendo la preparación de la superficie, los componentes del mezclado de la resina, la aplicación del primer, resina y laminados, el curado del compuesto y la aplicación de cubiertas protectoras.

2.4.3 Inspección para evitar delaminaciones

Se permite que hasta 24 horas antes que cure la capa inicial de resina, se pueda llevar a cabo la inspección por un inspector certificado, quien llevará a cabo pruebas visuales y acústicas de la superficie de las capas del laminado. Las delaminaciones extensas deberán ser marcadas para su reparación. Para delaminaciones pequeñas, menores que 13 cm², no se necesitarán de algún método correctivo.

2.4.4 Pruebas del material

1. Prueba a tensión: El inspector certificado será responsable de que los ensayos de los laminados y la resinas sean aprobadas en laboratorio, donde se fabricarán y probarán especímenes para pruebas a tensión (*Figura 2.8*).



Figura 2.8. Pruebas de tensión

2. Prueba de adherencia: El inspector certificado será el responsable de conducir las pruebas de adherencia de los laminados totalmente curados.

2.4.5 Reporte

El inspector deberá elaborar un reporte para el ingeniero de proyecto.

2.5 Control de Seguridad

1. Deberá tenerse el mayor cuidado en cuanto a la utilización de la herramienta adecuada.
2. Deberá proveerse de los andamios necesarios para el acceso a la estructura que pretende ser reforzada, así como de la indumentaria adecuada, tal como goggles o lentes, guantes cinturones de seguridad, mascararas, etc; todo ello dependiendo del tipo de trabajo.
3. En el caso de utilizar solventes orgánicos, deberán evitarse posibles inhalaciones.
4. En el caso de que el primer, la resina o pintura hagan contacto con la piel, deberán removerse con agua y jabón. Si alguno de estos mismos elementos hace contacto con los ojos, deberá ser removido tan pronto como sea posible lavándolos con grandes volúmenes de agua. Deberá consultarse inmediatamente con el personal médico en el sitio.
5. Deberá existir un sistema de comunicación eficiente, tal que garantice, de ser necesario ayuda médica de urgencia en el sitio de trabajo, así como la localización previa de los hospitales más cercanos.

CAPÍTULO 3

**Revisión de losas con dos
nervaduras de concreto reforzado,
reforzadas mediante elementos
laminados de fibras de carbono**

Como se ha mencionado, el incremento en las dimensiones y capacidad de carga de los transportes que circulan en la actualidad en la red carretera federal, así como el aumento en la frecuencia de paso de los mismos, hace necesario revisar la mayoría de los puentes carreteros existentes en México. Las dudas sobre la capacidad de carga actual de estas superestructuras, así como su capacidad remanente se cifran en el hecho de que la mayoría de estos puentes, fueron diseñados en el periodo de 1940 a 1980 aproximadamente, y corresponde a los camiones tipo HS-15 y HS-20, (Figura 3.1) cuyo peso total es de 24.5 t, con 3 ejes y 32.8 t, con 5 ejes respectivamente. Para 1980 se autorizó por la S.C.T. la circulación de camiones tipo T3-S3 y T3-S2-R4 (Figura 3.2) cuyo peso total es de 46 t, con 6 ejes y 77.5 t, con 9 ejes, respectivamente.

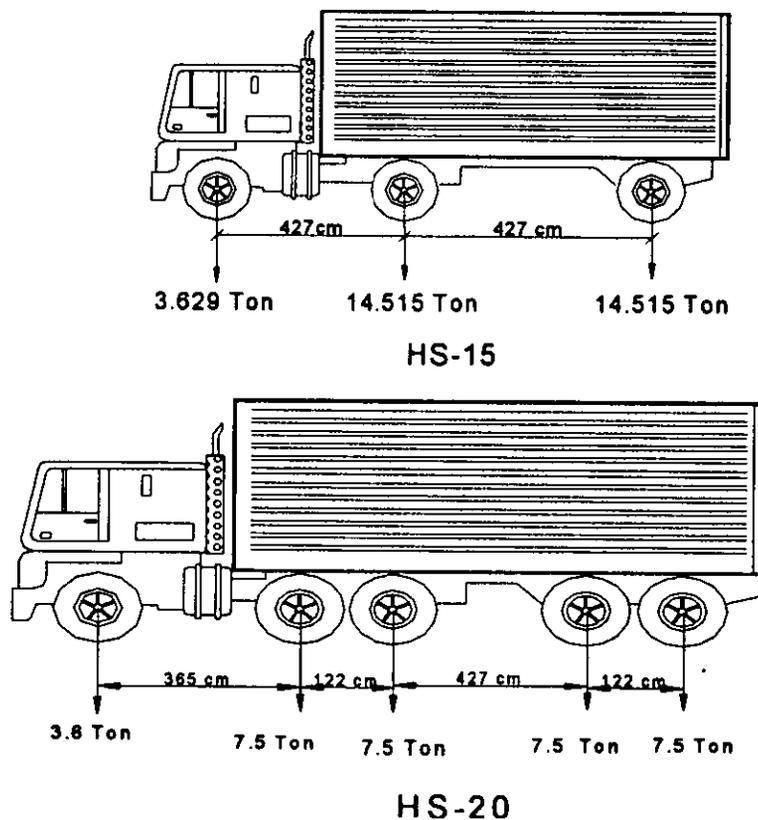


Figura 3.1. Camiones tipo HS - 15 y HS - 20

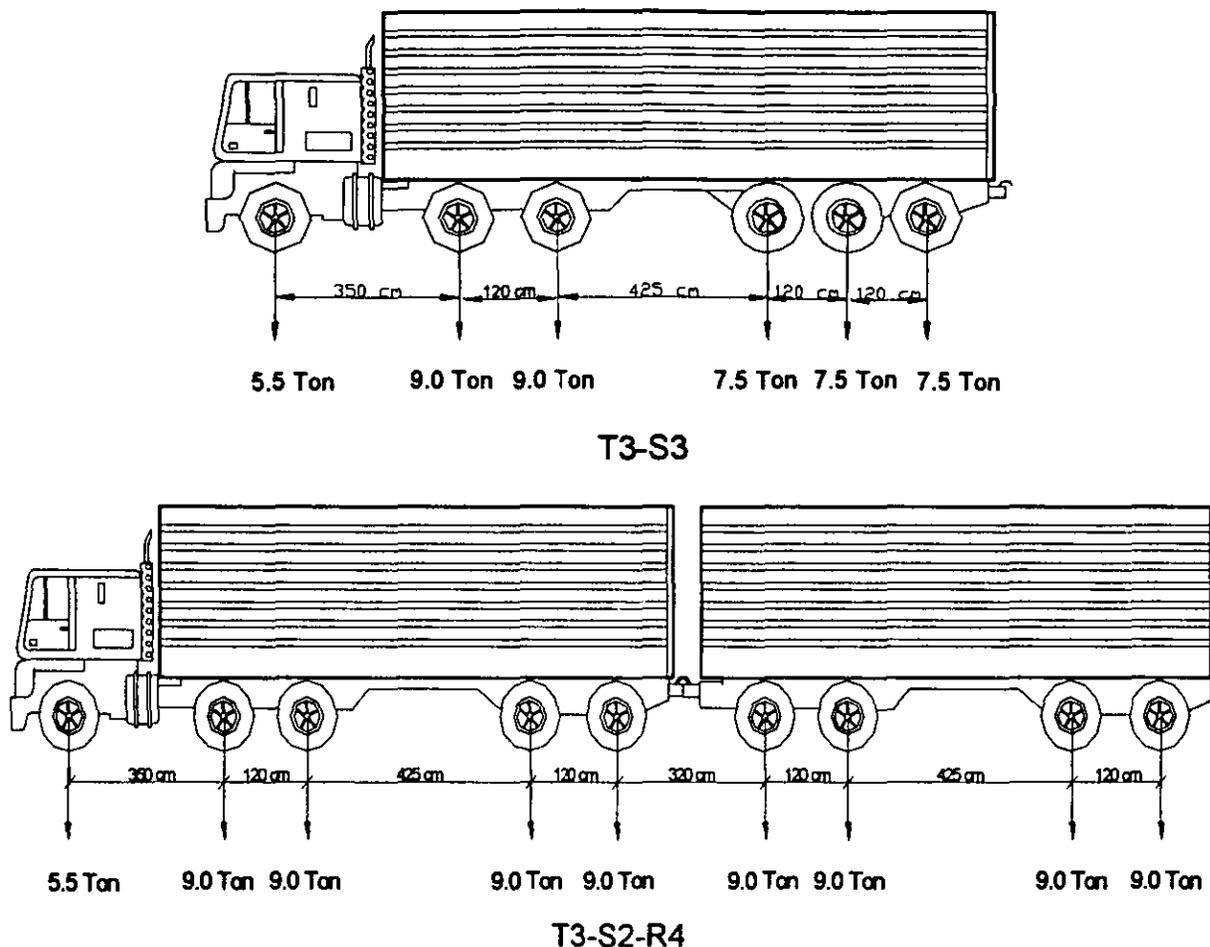


Figura 3.2. Carga tipo T3 – S3 y T3 – S2 –R4

Así es como, uno de los objetivos de esta tesis es el revisar la capacidad de carga actual de los puentes en servicio de concreto reforzado en especial las losas con dos nervaduras, y reforzar los mismos mediante elementos laminados de fibras de carbono. La revisión de estos puentes se basó en los proyectos tipo editados por la Secretaria de Asentamientos y Obras Públicas 1963 (SAHOP, 1963) para superestructuras de puentes con dos nervaduras de concreto reforzado.

3.1. Generalidades

3.1.1. Diagrama de flujo para efectuar la revisión de una viga a flexión

En la *figura 3.3* se muestra un diagrama de flujo en el que se consideran los pasos más importantes para llevar a cabo la revisión por flexión de una viga o nervadura por el método de esfuerzos permisibles.

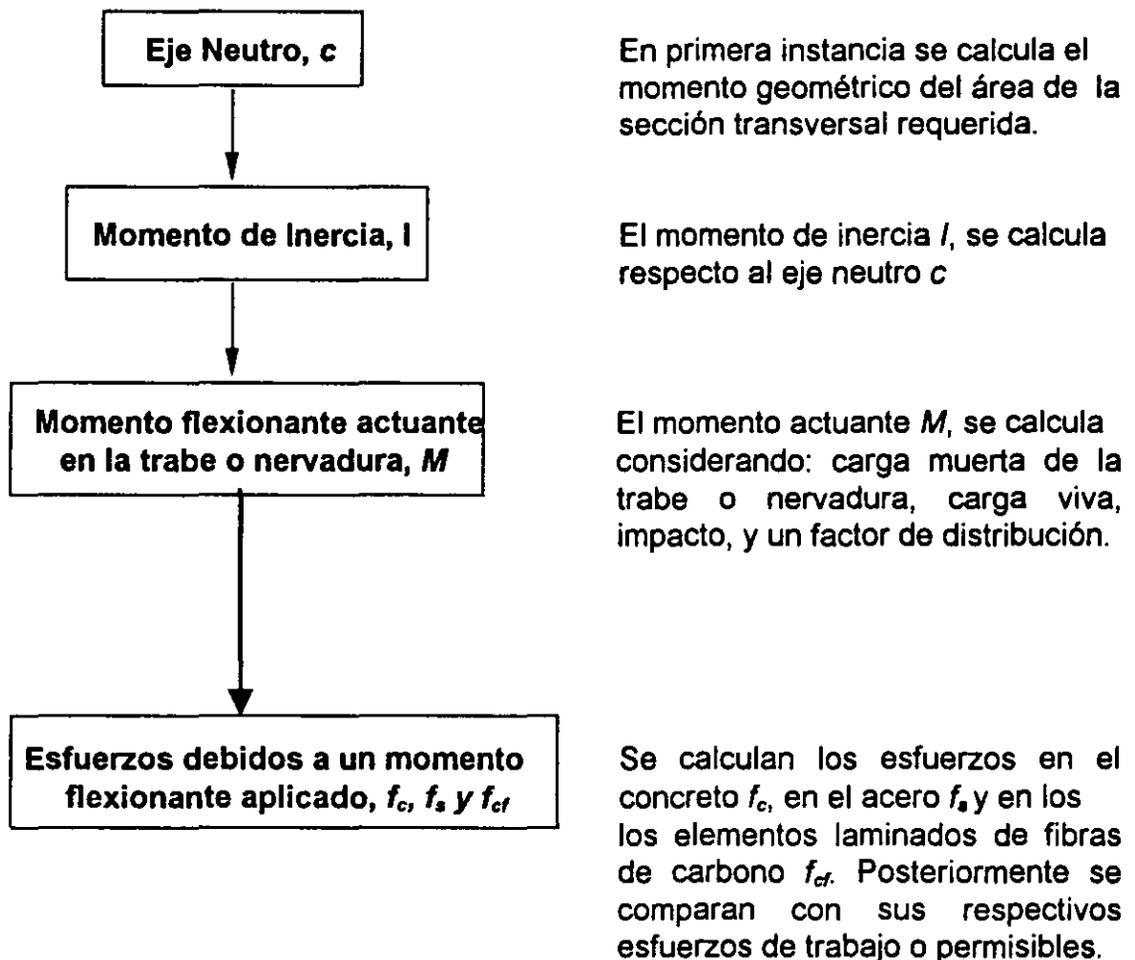


Figura 3.3. Diagrama de flujo para la revisión de traveses por flexión mediante el método de esfuerzos permisibles

3.1.2. Criterio de Revisión.

El criterio de revisión es el de esfuerzos normales permisibles y que se basa en la ecuación de la teoría elástica para esfuerzos por flexión:

$$f = \frac{Mc}{I} \quad (\text{ec. 3.1})$$

Esta ecuación establece que los esfuerzos normales f son proporcionales al momento flexionante M e inversamente proporcionales al momento de inercia I . Los esfuerzos varían linealmente con la distancia desde el eje neutro c ; pueden ser positivos (compresión) o negativos (tensión). Los esfuerzos máximos se localizarán en las fibras extremas de las nervaduras (McCormack, 1978). La elección del criterio de esfuerzos permisibles se basa en el hecho de que fue con este mismo criterio con el que originalmente se diseñaron estas estructuras (Figura 3.4).

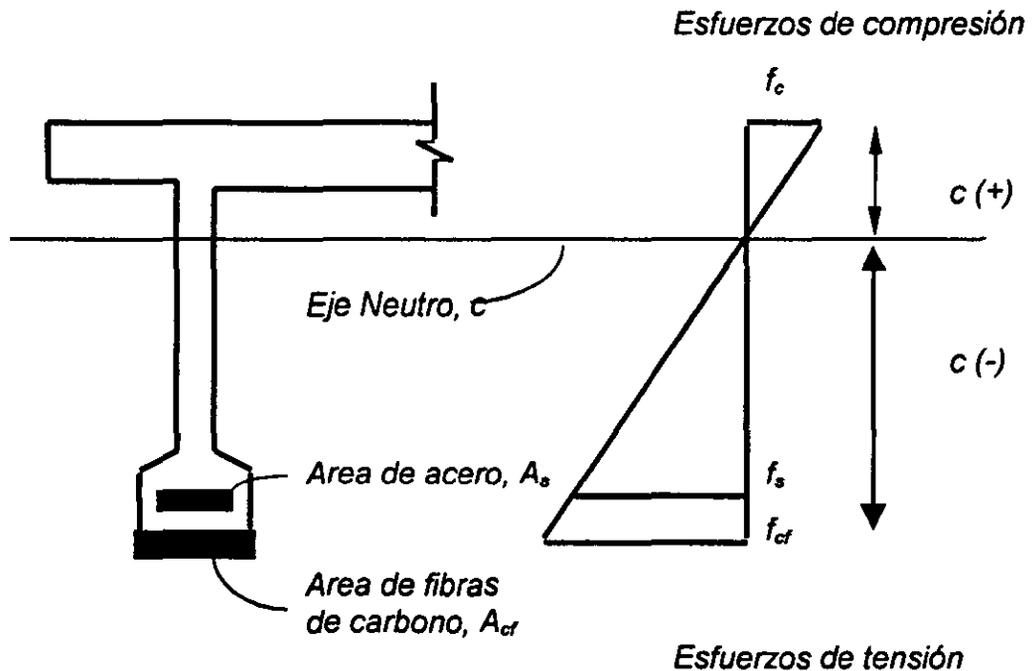


Figura 3.4. Diagrama de esfuerzos en una media sección de una losa con dos nervaduras

Capítulo 3 Revisión de losas con dos nervaduras de concreto reforzado reforzadas mediante elementos laminados de fibras de carbono

Como podemos observar (Figura 3.4) los esfuerzos de tensión f_s los toma el área de acero A_s y en su caso el área de fibras de carbono A_{cf} ; los esfuerzos de compresión f_c los toma el concreto por arriba del eje neutro.

Para obtener los esfuerzos es necesario hacer la sección transformada $n_s \times A_s$ del acero y el concreto mediante la relación de los módulos de elasticidad, en donde E_c y E_s son el módulo de elasticidad del concreto y del acero, respectivamente

$$n_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (\text{ec. 3.2})$$

Entonces la ecuación para obtener los esfuerzos de tensión se presenta de la siguiente manera:

$$f_s = n_s \frac{Mc}{I} \quad (\text{ec. 3.3})$$

Un análisis similar es utilizado para encontrar los esfuerzos en los elementos laminados de fibras de carbono f_{cf} , que como podemos observar en la figura 3.4 estas se colocan como un elemento adicional para contrarrestar los esfuerzos de tensión en las nervaduras. En este caso la sección equivalente se designará como $n_{cf} \times A_{cf}$, donde n_{cf} será la relación modular de los materiales involucrados, las fibras de carbono y el concreto.

$$n_{cf} = \frac{E_{cf}}{E_c} \quad (\text{ec. 3.4})$$

Así la ecuación designada para obtener los esfuerzos en los elementos laminados de fibras de carbono se escribe como sigue:

$$f_{cf} = n_{cf} \frac{Mc}{I} \quad (\text{ec. 3.5})$$

3.1.3. Estructura a revisar

Se revisarán las superestructuras de losas con dos nervaduras de concreto reforzado, que aparecen en los proyectos tipo editados por la Secretaría de Asentamientos y Obras Públicas en el año de 1963 (SAHOP, 1963). En la (Figura 3.6) se muestra un ejemplo de este tipo de estructuras.

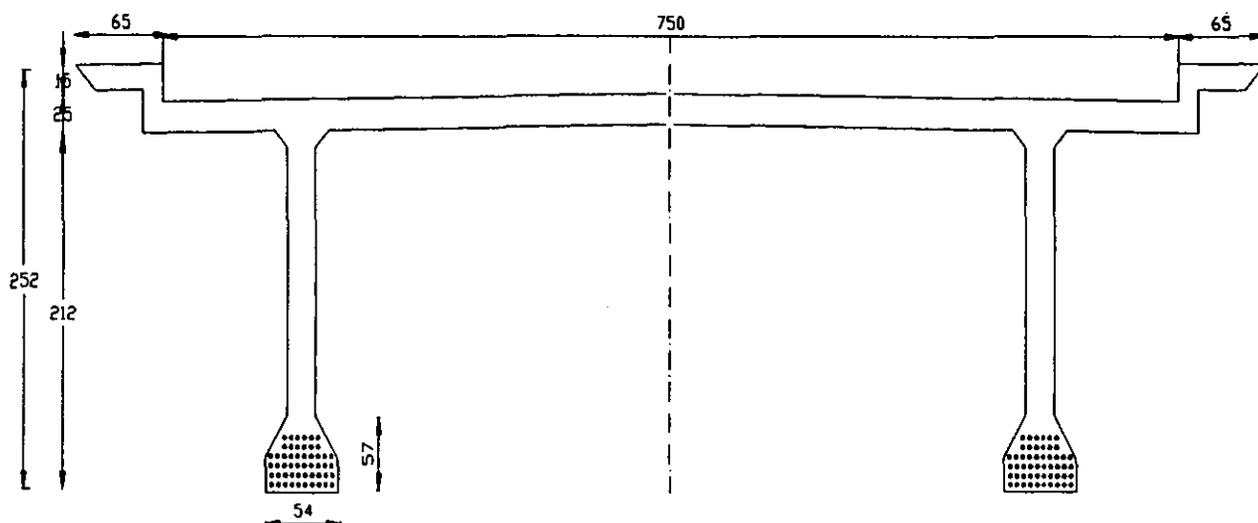


Figura 3.6. Losa con dos nervaduras de concreto reforzados (SAHOP, 1963)

3.1.4. Efectos a considerar

En la revisión se consideraron las siguientes cargas y efectos:

- Carga muerta.- incluye el peso propio de las dos nervaduras, losa, guarnición, banqueteta, asfalto y parapeto.
- Carga viva.- corresponde al caso más desfavorable en el cual circula un camión denominado T3-S2-R4 en la extrema izquierda de la losa y un camión HS-20 cargado lo más cerca posible del centro de línea del camino, simultáneamente.
- Factor de impacto.- el impacto se expresa con la ecuación (AASHTO, 1996):

$$I = \frac{15}{L + 38} \quad (\text{ec. 3.6})$$

Capítulo 3 Revisión de losas con dos nervaduras de concreto reforzado reforzadas mediante elementos laminados de fibras de carbono

donde L es la longitud cargada, en metros. El valor máximo es de 0.30

- Factor de concentración transversal. Se calcula según el criterio de Courbón y se consideran los efectos por separado de cada uno de los camiones. La teoría de Courbón considera que el diafragma es infinitamente rígido con respecto a las traveses (Heins & Lawrie, 1992). Para nuestro caso el factor fue considerado de 1.2.

3.1.5. Propiedades mecánicas de los materiales

En la tabla 3.1. se describen las propiedades mecánicas de los materiales involucrados en esta revisión.

CONCRETO		
	CLAROS DE 8 A 23 m	CLAROS DE 25 A 32 m
Esfuerzo máximo de ruptura:	$f'c=200 \text{ kg/cm}^2$	$f'c=250 \text{ kg/cm}^2$
Esfuerzo máximo admisible de trabajo:	$f'c=80 \text{ kg/cm}^2$	$f'c=100 \text{ kg/cm}^2$
Esfuerzo máximo a compresión:	fc	fc
ACERO		
	CLAROS DE 8 A 23 m	CLAROS DE 25 A 32 m
Acero de refuerzo grado estructural:	A40	A60
Límite de fluencia:	$f_y=2,300 \text{ kg/cm}^2$	$f_y=4,000 \text{ kg/cm}^2$
Esfuerzo máximo admisible de trabajo:	$f_s=1,150 \text{ kg/cm}^2$	$f_y=2,000 \text{ kg/cm}^2$
Esfuerzo máximo a tensión:	fs	fs
ELEMENTOS LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO		
Resistencia a la tensión:	590 kg/cm^2 (para cada cm de ancho de lámina)	
Resistencia de diseño:	35,500 kg/cm^2	
Espesor de una lámina de fibras de carbono: (laminados de fibra de carbono de alto módulo elástico, ver p. 18)	0.165 cm	
Área de una lámina de 40 cm de ancho:	0.825 cm^2	
Esfuerzo de tensión admisible para cargas de larga duración:	11,833 kg/cm^2	
Esfuerzo de tensión admisible para cargas de corta duración:	23,666 kg/cm^2	
Fuerza resistente admisible por cada lámina de fibras de carbono para cargas de larga duración:	9.76 tons	
Fuerza resistente admisible por cada lámina de fibras de carbono para cargas de corta duración:	19.52 tons	

Tabla 3.1. Propiedades mecánicas de los materiales

3.1.6. Metodología

A continuación se describen la secuencia de cálculo de los esfuerzos por flexión que se producen en las superestructuras de las losas con dos nervaduras de concreto reforzado:

1. Se procede a obtener el momento flexionante producido por el peso propio o carga muerta de la estructura en cuestión.
2. Se obtiene el factor de impacto
3. Se calculan los esfuerzos por flexión en el concreto y en el acero para la condición de operación en vacío.
4. Cálculo de momentos flexionantes producidos por el paso de los camiones de carga denominada HS-20 y T3-S2-R4, respectivamente.
5. Se procede obtener el factor de distribución lateral según el criterio de Courbón.
6. Se obtiene el momento flexionante debido a la suma de la condición en vacío más la condición de la operación en vacío.
7. Finalmente se calculan los esfuerzos en el concreto, en el acero y en el caso de que se requieran, en los elementos laminados de fibras de carbono.

3.2. Revisión de losas con dos nervaduras sanas de concreto reforzado

Con los proyectos tipo de superestructuras de losas con dos nervaduras de concreto reforzado editados por la SAHOP en 1963 (SAHOP, 1963), se revisará la magnitud de los esfuerzos en el acero y en el concreto. Con el objeto de verificar que los puentes, que fueron diseñados para cargas de servicio HS-15, puedan resistir las cargas de servicio actuales, se utilizaron las cargas vivas correspondientes a los camiones corresponden al paso simultáneo de un camión T3-S2-R4 y HS-20. La colocación de estas cargas será excéntrica de manera de provocar la máxima concentración transversal en una de las nervaduras.

También se pretende reforzar estas superestructuras, tratando de mitigar los efectos de las cargas de servicio actuales, mediante la aplicación de elementos laminados de fibras de carbono. Para ello se revisaron los esfuerzos en las fibras de carbono. Se consideran los dos casos siguientes

Caso 1. Superestructuras de losas con dos nervaduras, empleando su diseño original.

Caso 2. Superestructuras losas con dos nervaduras, empleando del diseño original y reforzadas mediante elementos laminados adheridos de fibras de carbono.

Para ambos casos se consideran las condiciones de carga siguientes:

- a) Operación en vacío, actuando sólo el peso propio.
- b) Operación en servicio con la cargas vivas correspondientes a un camión T3-S2-R4 pasando simultáneamente con un camión HS-20, colocados excéntricamente a manera de provocar la máxima concentración transversal en una de las nervaduras.
- c) Impacto según AASHTO y
- d) Coeficiente de distribución lateral, según Courbón, de 1.20

Para cada condición de carga se considera que los elementos de la superestructura se encuentran sanos sin deterioro provocado por el uso y/o medio ambiente. Además, para el caso 2 se considera que dichas nervaduras se reforzaron mediante un elemento laminado de fibras de carbono.

CASO 1
LOSAS CON DOS NERVADURAS EMPLEANDO SU DISEÑO ORIGINAL

CLARO L m	OPERACION EN VACIO				
	CARGA MUERTA t/m	MOMENTO CARGA MUERTA t m	ESFUERZOS		
			fc kg/cm ²	fs kg/cm ²	fcf kg/cm ²
32	7.60	972.48	41.38	1249.35	0
30	7.66	862.28	37.10	1224.52	0
25	7.08	553.12	30.48	1121.41	0
23	7.26	480.13	27.69	797.12	0
20	6.80	340.00	23.34	724.52	0
18	6.64	268.92	22.22	684.77	0
16	6.27	200.64	19.56	645.93	0
15	6.22	175.05	18.93	604.97	0
14	6.03	147.84	17.94	588.76	0
13	6.06	127.92	17.00	574.36	0
12	6.04	108.64	16.73	581.48	0
11	6.04	91.41	16.14	578.62	0
10	6.05	75.60	14.54	558.17	0
9	6.03	61.02	14.18	544.98	0
8	6.00	48.00	13.60	534.92	0

fc= Esfuerzos producidos en el concreto
 fs= Esfuerzos producidos en el acero
 fcf= Esfuerzos producidos en las fibras de carbono

Tabla 3.2. Esfuerzos y momentos flexionantes presentados en la condición de operación en vacío.
 Diseño original

CASO 1
LOSAS CON DOS NERVADURAS EMPLEANDO SU DISEÑO ORIGINAL

CLARO L m	OPERACIÓN EN SERVICIO							
	CARGA VIVA PARA 1HS-20 + 1T3-S2-R4				MOMENTO DE DISEÑO t m	ESFUERZOS		
	M. HS-20 t m	M. T3-S2-R4 t m	FACTOR IMPACTO	M.CARGA VIVA t m		fc kg/cm2	fs kg/cm2	fcf kg/cm2
32	223.18	415.00	1.21	929.92	1902.40	80.95	2444.02	0
30	206.88	376.27	1.22	854.14	1716.42	73.85	2437.48	0
25	166.15	279.47	1.24	662.06	1215.18	66.96	2463.69	0
23	149.87	240.76	1.25	584.02	1064.15	61.37	1766.72	0
20	125.48	185.00	1.26	468.93	808.93	55.53	1723.79	0
18	109.23	150.69	1.27	395.45	664.37	54.91	1691.74	0
16	93.01	122.71	1.28	330.77	531.41	51.80	1710.80	0
15	84.92	109.26	1.28	298.96	474.01	51.27	1638.19	0
14	76.83	95.82	1.29	266.94	414.78	50.34	1651.83	0
13	68.75	82.16	1.29	234.35	362.27	48.14	1626.62	0
12	60.69	70.91	1.30	205.30	313.94	48.35	1680.30	0
11	52.64	61.84	1.30	179.43	270.84	47.84	1714.39	0
10	44.63	53.04	1.30	153.83	229.43	44.13	1693.93	0
9	38.02	44.29	1.30	130.29	191.31	44.45	1708.67	0
8	31.23	35.60	1.30	106.35	154.35	43.74	1720.09	0

M = Momento flexionante
 DIST.LAT.= Distribución lateral
 fc= Esfuerzos producidos en el concreto
 fs= Esfuerzos producidos en el acero
 fcf= Esfuerzos producidos en las fibras de carbono

Tabla 3.3. Esfuerzos y momentos flexionantes presentados en la condición de operación en servicio.
Diseño original

CASO 2

LOSAS CON DOS NERVADURAS EMPLEANDO SU DISEÑO ORIGINAL Y REFORZADAS MEDIANTE ELEMENTOS LAMINADOS ADHERIDOS DE FIBRAS DE CARBONO

CLARO L m	OPERACIÓN EN VACIO				
	CARGA MUERTA t/m	MOMENTO CARGA MUERTA t m	ESFUERZOS		
			fc kg/cm ²	fs kg/cm ²	fcf kg/cm ²
32	7.60	972.48	41.18	1236.19	3034.93
30	7.66	862.28	36.29	1215.22	2943.28
25	7.08	553.12	30.22	1105.33	2724.38
23	7.26	480.13	27.38	790.00	1948.87
20	6.80	340.00	23.13	716.43	1756.89
18	6.64	268.92	22.18	674.21	1729.20
16	6.27	200.64	19.49	634.74	1612.41
15	6.22	175.05	18.80	594.18	1567.84
14	6.03	147.84	17.78	577.22	1534.73
13	6.06	127.92	16.85	562.24	1470.16
12	6.04	108.64	16.64	567.32	1481.58
11	6.04	91.41	15.68	566.07	1470.46
10	6.05	75.60	14.47	541.45	1376.61
9	6.03	61.02	13.95	526.72	1387.03
8	6.00	48.00	13.31	515.22	1358.78

fc= Esfuerzos producidos en el concreto

fs= Esfuerzos producidos en el acero

fcf= Esfuerzos producidos en las fibras de carbono

Tabla 3.4. Esfuerzos y momentos flexionantes presentados en la condición de operación en vacío.
Diseño original

CASO 2

LOSAS CON DOS NERVADURAS EMPLEANDO SU DISEÑO ORIGINAL Y REFORZADAS MEDIANTE ELEMENTOS LAMINADOS ADHERIDOS DE FIBRAS DE CARBONO

CLARO L m	OPERACIÓN EN SERVICIO							
	CARGA VIVA PARA 1HS-20 + 1T3-S2-R4				MOMENTO DE DISEÑO t m	ESFUERZOS		
	M. HS-20 t m	M. T3-S2-R4 t m	FACTOR IMPACTO	M.CARGA VIVA t m		fc kg/cm ²	fs kg/cm ²	fcf kg/cm ²
32	223.18	415.00	1.21	929.92	1902.40	80.55	2418.27	2968.52
30	206.88	376.27	1.22	854.14	1716.42	72.24	2418.98	2929.39
25	166.15	279.47	1.24	662.06	1215.18	66.39	2428.36	2992.68
23	149.87	240.76	1.25	584.02	1064.15	60.69	1750.94	2159.73
20	125.48	185.00	1.26	468.93	808.93	55.02	1704.53	2090.01
18	109.23	150.69	1.27	395.45	664.37	54.80	1665.65	2136.01
16	93.01	122.71	1.28	330.77	531.41	51.61	1681.16	2135.29
15	84.92	109.26	1.28	298.96	474.01	50.90	1608.96	2122.76
14	76.83	95.82	1.29	266.94	414.78	49.90	1619.46	2152.93
13	68.75	82.16	1.29	234.35	362.27	47.73	1592.29	2081.77
12	60.69	70.91	1.30	205.30	313.94	48.08	1639.37	2140.65
11	52.64	61.84	1.30	179.43	270.84	46.47	1677.23	2178.42
10	44.63	53.04	1.30	153.83	229.43	43.92	1643.19	2088.86
9	38.02	44.29	1.30	130.29	191.31	43.75	1651.41	2174.37
8	31.23	35.60	1.30	106.35	154.35	42.79	1656.76	2184.67

M = Momento Flexionante

fc= Esfuerzos producidos en el concreto

fs= Esfuerzos producidos en el acero

fcf= Esfuerzos producidos en las fibras de carbono

Tabla 3.5. Esfuerzos y momentos flexionantes presentados en la condición de operación en servicio
Diseño original

3.2.1. Comentarios: Revisión de losas con dos nervaduras sanas de concreto reforzado

Como se puede observar en la *Tabla 3.2*, los esfuerzos en operación en vacío en el concreto y el acero se mantienen por debajo de los valores admisibles (ver *Tabla 3.1*). Sin embargo, en la misma condición de operación en servicio (*Tabla 3.3*) podemos observar que los esfuerzos en el acero aumentan. Tal esfuerzo máximo, se presenta en el claro de 23 m con un esfuerzo en el acero $f_s=1,766 \text{ kg/cm}^2$, que excede en un 53% aproximadamente el esfuerzo admisible, pero sin llegar al nivel de fluencia que es de $2,300 \text{ kg/cm}^2$. Para las superestructuras cuyas losas tienen claros mayores o iguales a 25 m, el esfuerzo máximo se presenta en el claro de 32 m con un esfuerzo en el acero de $f_s=2444 \text{ kg/cm}^2$, excediendo en un 22% el esfuerzo admisible, conservando aún una resistencia remanente de aproximadamente el 63% antes del límite de fluencia.

Este es el parámetro de decisión entre un refuerzo requerido y uno no lo es; es decir que mientras los esfuerzos se mantengan por debajo del límite de fluencia, la estructura podrá resistir sin ningún problema las cargas de servicio actuales y no será necesario tomar medidas para el refuerzo de dicha estructura.

Para el caso del concreto también crecieron notablemente los esfuerzos en este material, sin embargo se mantienen por debajo del esfuerzo admisible de 100 kg/cm^2 y como podemos observar en la *tabla 3.3* aún existe una resistencia remanente en el concreto de aproximadamente un 20%.

Podemos decir que bajo las condiciones con las que se llevó cabo la revisión del Caso 1 (*Tablas 3.2 y 3.3*) las losas con dos nervaduras de concreto reforzado resisten perfectamente las cargas en servicio de un camión T3-S2-R4 y un HS-20, con una resistencia remanente en los casos más críticos del 30% (para losas cuyos claros son menores que 25 m) y del 63% (para claros mayores o iguales de 25 m). Por lo tanto no necesitan de ningún tipo de refuerzo.

Ahora bien para las losas con dos nervaduras analizadas en el Caso 2 (*Tablas 3.4 y 3.5*) y de acuerdo a las condiciones referidas con anterioridad, podemos decir que la distribución de esfuerzos tanto en el acero como en el concreto es sumamente parecida que la manejada en el Caso 1 (*Tablas 3.2 y 3.3*) en el cual no se encontró ningún método de refuerzo para mitigar los esfuerzos. En este caso (Caso2), aplicando elementos laminados de fibras de carbono, los esfuerzos tanto en el acero como en el concreto disminuyen cantidades despreciables, alrededor de un 1.5 a un 2%. Sin embargo hay que mencionar que los esfuerzos en las fibras de carbono, únicamente llegaron a $f_{\sigma} = 2,968 \text{ kg/cm}^2$, por lo que se utilizó su capacidad resistente admisible en un 12.5%. Así se puede afirmar que no importa qué tan grandes puedan llegar a ser los esfuerzos de tensión y en que proporción que tan poco las fibras de carbono puedan llegar a reducir estos esfuerzos, lo importante es mantener las fibras de carbono y al concreto lejos de su esfuerzo de falla, ya que como sabemos las fibras de carbono presentan una falla de tipo frágil.

3.3. Revisión de losas con dos nervaduras dañadas de concreto reforzado

En este inciso se revisarán las nervaduras simulando el paso del tiempo y el ataque de agentes externos que pudiesen afectar en un momento dado la estructura. Entre los agentes dañinos que pueden hacer estragos en estas estructuras se encuentran los cambios bruscos de temperatura, la salinidad del medio ambiente que aunada con imperfecciones en el concreto y el propio agrietamiento del mismo hormigón provocan corrosión en el interior de la estructura con lo que el acero de refuerzo se ve mermando en cuanto a sus propiedades resistentes. Otro de los efectos que pueden crear cierto deterioro con el paso del tiempo son los impactos recibidos a lo largo de la historia de las estructuras, entre otros.

Con las anteriores condiciones de deterioro y tomando en cuenta el aumento en la capacidad de carga en los transportes en México, resulta interesante el conocer la capacidad resistente de estas estructuras. En este sentido se estudiarán dos casos:

Caso 3. Superestructuras de losas con dos nervaduras suponiendo que su resistencia ha sido afectada por agentes externos y no se ha tomado ninguna medida para mitigar los efectos del deterioro.

Caso 4. Superestructuras de losas con dos nervaduras suponiendo que su resistencia ha sido afectada por agentes externos y se han reforzado mediante elementos laminados adheridos de fibras de carbono.

Para ambos casos se consideran las condiciones de carga siguientes:

- a) Operación en vacío actuando sólo el peso propio.
- b) Operación en servicio con la carga de diseño anteriormente mencionada de un camión T3-S2-R4 pasando simultáneamente con un camión T3-S2-R4 y un HS-20, colocados excéntricamente a manera de provocar la máxima concentración transversal en una de las nervaduras.
- c) Impacto según AASHTO y
- d) Coeficiente de distribución lateral según Courbón de 1.20

Se considerará para cada condición de carga lo siguiente:

Que los elementos de la superestructura se encuentran en un estado tal que han sufrido deterioros provocados por el uso y/o medio ambiente. Además, sólo para el caso 4 se considera que dichas nervaduras se reforzarán mediante un elemento laminado de fibras de carbono.

Para simular el deterioro y el paso del tiempo sufrido por la estructura, provocado por el ambiente y/o paso del tiempo, se consideró que dicho deterioro ha llegado a tal grado que todas las varillas de refuerzo de la fila más inferior de cada nervadura ha dejado de ser efectiva.

CASO 3

LOSAS CON DOS NERVADURAS SUPONIENDO QUE FUERON DAÑADAS POR AGENTES EXTERNOS

CLARO L m	OPERACIÓN EN VACIO				
	CARGA MUERTA t/m	MOMENTO CARGA MUERTA t m	ESFUERZOS		
			f_c kg/cm ²	f_s kg/cm ²	f_{cf} kg/cm ²
32	7.60	972.48	45.32	1644.74	0.00
30	7.66	862.28	40.60	1666.74	0.00
25	7.08	553.12	34.35	1493.78	0.00
23	7.26	480.13	33.59	1301.12	0.00
20	6.80	340.00	30.61	1175.10	0.00
18	6.64	268.92	27.81	1024.84	0.00
16	6.27	200.64	28.64	1008.25	0.00
15	6.22	175.05	24.15	872.06	0.00
14	6.03	147.84	23.68	876.64	0.00
13	6.06	127.92	22.70	892.51	0.00
12	6.04	108.64	22.91	941.00	0.00
11	6.04	91.41	24.34	1005.25	0.00
10	6.05	75.60	22.62	1090.55	0.00
9	6.03	61.02	20.28	926.61	0.00
8	6.00	48.00	20.24	977.05	0.00

f_c = Esfuerzos producidos en el concreto

f_s = Esfuerzos producidos en el acero

f_{cf} = Esfuerzos producidos en las fibras de carbono

Tabla 3.6. Esfuerzos y momentos flexionantes presentados en la condición de operación en vacío
Suponiendo que fueron dañadas por agentes externos

CASO 3

LOSAS CON DOS NERVADURAS SUPONIENDO QUE FUERON DAÑADAS POR AGENTES EXTERNOS

CLARO L m	OPERACION EN SERVICIO						
	CARGA VIVA PARA 1HS-20 + 1T3-S2-R4			MOMENTO DE DISEÑO t m	ESFUERZOS		
	M. HS-20 t m	FACTOR IMPACTO	M.CARGA.VIVA t m		fc kg/cm ²	fs kg/cm ²	fcf kg/cm ²
32	223.18	1.21	929.92	1902.40	88.65	3217.50	0.00
30	206.88	1.22	854.14	1716.42	80.82	3317.75	0.00
25	166.15	1.24	662.06	1215.18	75.47	3281.78	0.00
23	149.87	1.25	584.02	1064.15	74.44	2883.78	0.00
20	125.48	1.26	468.93	808.93	72.82	2795.80	0.00
18	109.23	1.27	395.45	664.37	68.72	2531.87	0.00
16	93.01	1.28	330.77	531.41	75.86	2670.44	0.00
15	84.92	1.28	298.96	474.01	65.41	2361.42	0.00
14	76.83	1.29	266.94	414.78	66.45	2459.53	0.00
13	68.75	1.29	234.35	362.27	64.29	2527.62	0.00
12	60.69	1.30	205.30	313.94	66.20	2719.19	0.00
11	52.64	1.30	179.51	270.92	72.14	2979.34	0.00
10	44.63	1.30	153.83	229.83	68.41	3297.91	0.00
9	38.02	1.30	130.29	191.31	63.57	2905.19	0.00
8	31.23	1.30	106.35	154.35	65.09	3141.77	0.00

M = Momento flexionante

fc= Esfuerzos producidos en el concreto

fs= Esfuerzos producidos en el acero

fcf= Esfuerzos producidos en las fibras de carbono

Tabla 3.7. Esfuerzos y momentos flexionantes presentados en la operación en servicio
Suponiendo que fueron dañadas por agentes externos

CASO 4

LOSAS CON DOS NERVADURAS SUPONIENDO QUE LAS LOSAS SON AFECTADAS POR AGENTES EXTERNOS Y REFORZADAS MEDIANTE ELEMENTOS LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO

CLARO L m	OPERACIÓN EN VACIO				
	CARGA MUERTA t/m	MOMENTO CARGA MUERTA t m	ESFUERZOS		
			fc kg/cm ²	fs kg/cm ²	fcf kg/cm ²
32	7.60	972.48	44.99	1621.94	4043.81
30	7.66	862.28	40.39	1639.68	4032.21
25	7.08	553.12	34.24	1462.72	3678.73
23	7.26	480.13	33.44	1277.21	3218.21
20	6.80	340.00	29.91	1154.19	3005.30
18	6.64	268.92	22.53	820.30	2187.39
16	6.27	200.64	28.23	981.60	2610.42
15	6.22	175.05	23.72	850.42	2354.51
14	6.03	147.84	23.32	850.94	2381.99
13	6.06	127.92	22.17	864.81	2380.75
12	6.04	108.64	13.09	586.17	1520.60
11	6.04	91.41	12.03	582.77	1503.86
10	6.05	75.60	10.34	559.63	1413.29
9	6.03	61.02	10.47	544.20	1422.47
8	6.00	48.00	9.62	531.01	1389.24

fc= Esfuerzos producidos en el concreto

fs= Esfuerzos producidos en el acero

fcf= Esfuerzos producidos en las fibras de carbono

Tabla 3.8. Esfuerzos y momentos flexionantes presentados en la operación en vacío. Suponiendo que fueron afectadas por agentes externos y reforzadas con los elementos laminados de fibras de carbono

CASO 4

LOSAS CON DOS NERVADURAS SUPONIENDO QUE LAS LOSAS SON AFECTADAS POR AGENTES EXTERNOS Y REFORZADAS MEDIANTE ELEMENTOS LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO

CLARO L m	OPERACIÓN EN SERVICIO							
	CARGA VIVA PARA 1HS-20 + 1T3-S2-R4				MOMENTO DE DISEÑO t m	ESFUERZOS		
	M. HS-20 t m	M. T3-S2-R4 t m	FACTOR IMPACTO	M.CARGA VIVA t m		f _c kg/cm ²	f _s kg/cm ²	f _{cf} kg/cm ²
32	223.18	415.00	1.21	929.92	1902.40	88.02	3172.89	3955.32
30	206.88	376.27	1.22	854.14	1716.42	80.39	3263.89	4013.18
25	166.15	279.47	1.24	662.06	1215.18	75.23	3213.55	4041.01
23	149.87	240.76	1.25	584.02	1064.15	74.12	2830.79	3566.40
20	125.48	185.00	1.26	468.93	808.93	71.16	2746.06	3575.12
18	109.23	150.69	1.27	395.45	664.37	55.67	2026.57	2701.98
16	93.01	122.71	1.28	330.77	531.41	74.76	2599.85	3456.95
15	84.92	109.26	1.28	298.96	473.96	64.24	2303.26	3188.43
14	76.83	95.82	1.29	266.94	414.78	65.43	2387.42	3341.48
13	68.75	82.16	1.29	259.47	387.39	67.15	2618.95	3604.86
12	60.69	70.91	1.30	205.30	313.94	37.83	1693.85	2197.04
11	52.64	61.84	1.31	179.43	270.84	35.65	1726.70	2227.90
10	44.63	53.04	1.31	153.83	229.43	31.39	1698.36	2144.52
9	38.02	44.29	1.32	130.29	191.31	32.83	1706.22	2229.92
8	31.23	35.60	1.33	106.35	154.35	30.92	1707.53	2233.64

M = Momento flexionante

f_c = Esfuerzos producidos en el concreto

f_s = Esfuerzos producidos en el acero

f_{cf} = Esfuerzos producidos en las fibras de carbono

Tabla 3.9. Esfuerzos y momentos flexionantes presentados en la operación en servicio. Suponiendo que fueron afectadas por agentes externos y reforzadas con los elementos laminados de fibras de carbono

3.3.1 Comentarios: Losas con dos nervaduras dañadas de concreto reforzado

Como observamos en el Caso 3 (*Tablas 3.6 y 3.7*) los esfuerzos en el concreto subieron hasta 88 kg/cm^2 y en el acero hasta $3,217.50 \text{ kg/cm}^2$, dada la pérdida de acero de refuerzo que aproximadamente es en un 20%, lo cual nos hace dudar sobre la capacidad resistente de estas estructuras.

Primeramente, prestemos atención a las losas cuyo claro es mayor o igual a 25 m. El esfuerzo máximo presente es de $f_s=3,317 \text{ kg/cm}^2$, el cual es definitivamente muy superior al admisible (alrededor del 65%); sin embargo, este esfuerzo queda por abajo del límite de fluencia de $4,000 \text{ kg/cm}^2$, con una resistencia remanente del 15%, antes de llegar a la fluencia.

Ahora bien, si observamos los resultados de las losas de menos de 25 m de claro podemos darnos cuenta que sobrepasan el esfuerzo límite de fluencia que según los proyectos tipo (*SAHOP, 1963*) es de $2,300 \text{ kg/cm}^2$. Es decir que técnicamente la resistencia del acero ha sido casi absorbida en su totalidad y

bastaría con cierto aumento significativo en la capacidad de carga de los vehículos para que pudiese ocurrir un colapso de la superestructura. El método que se propone para mitigar los esfuerzos son las fibras de carbono, cuya aplicación de la metodología utilizada es muy similar a la presentada en el *subcapítulo 3.2*, donde se consideraba que las nervaduras estaban completamente sanas.

En este sentido, para el Caso 4 (*Tablas 3.8 y 3.9*) los esfuerzos de tensión a los que resulta estar sometido el acero de refuerzo, al aplicarse los elementos laminados de fibras de carbono, no se observa una disminución significativa de dichos esfuerzos; sin embargo como se vio anteriormente (*ver subcapítulo 3.2*), queda confirmado el hecho que su ventaja, respecto a otros métodos de refuerzo, estriba en el esfuerzo de falla de este material. En este sentido las superestructuras sometidas a las condiciones sustentadas en el Caso 4, el esfuerzo en las fibras de carbono apenas alcanzó $f_{cr} = 3955 \text{ kg/cm}^2$, que es el 17% de su esfuerzo admisible a la tensión para cargas de corta duración.

Por lo anterior si se recomienda reforzar las losas cuyos claros sean menores de 25 m, ya que estas estructuras presentan esfuerzos superiores al de fluencia lo que pone en peligro la resistencia de la superestructura. Y de igual modo se recomienda el uso de los laminados adheridos de fibras de fibras de carbono para su refuerzo. El detalle que hay que cuidar con este material es el de mantener los esfuerzos de tensión alejados de su esfuerzo de falla (*ver Tabla 3.2*) de falla ya que este material es por definición un material frágil, lo que en su caso ocasionaría la falla súbita de la estructura.

CAPÍTULO 4

Conclusiones

Se han presentado tres técnicas para el refuerzo de superestructuras de puentes: el presfuerzo adicional externo, las placas de acero adheridas y los elementos laminados de fibras de carbono. El presfuerzo adicional externo ha demostrado ser un método muy eficaz de refuerzo de puentes, y es en México una técnica muy recurrida y relativamente exitosa. Sin embargo como hemos observado presenta aspectos destructivos (construcción de cabezales y postizos, así como la instalación de los desviadores) que en ocasiones dañan el puente más de lo que lo repara, arruinando la estética concebida en el diseño original; además de que se requiere la instalación de una obra falsa sumamente complicada y en ocasiones la interrupción del tráfico, lo que hace una molestia difícilmente tolerable. Otro de los inconvenientes de esta técnica de refuerzo es que al paso del tiempo no se ha encontrado una manera efectiva de detener la corrosión de los tendones, lo que en los últimos tiempos ha ocasionado su fragilización y con ello el colapso en forma súbita de estas estructuras.

La segunda técnica analizada, las placas de acero adheridas, han mostrado ser una técnica relativamente confiable en el Reino Unido principalmente, ya que en México fue esporádicamente utilizada con malos resultados. En el Reino Unido, esta técnica, demostró avances en cuanto al no deteriorar la estética original del puente, así como poder realizar los trabajos de refuerzo aún con la presencia del tránsito vehicular (no obstante que la presencia del tránsito disminuye en un 30% la efectividad del refuerzo por las vibraciones emitidas por el mismo). Sin

embargo, existen deficiencias importantes en cuanto a la incertidumbre de la transmisión de esfuerzos de la placa a los pernos, así como en el procedimiento con el que se deben fijar las placas con el epóxico. Si la adherencia de estas placas no se hace cuidadosamente, la transmisión de cargas no se llevará a cabo, no trabajando la sección compuesta, induciendo fallas por deslizamiento y despegado de las placas. Un impedimento importante en la utilización de esta técnica es la dimensión del material, ya que no se pueden disponer longitudes de placa muy grandes, cuestión por la cual se genera un manejo sumamente incomodo en la obra debido al peso de las mismas. En este sentido se deberán tener longitudes de placa razonables que en ocasiones serán insuficientes y deberán colocarse por segmentos. En las orillas de estos segmentos deberá tenerse mucho cuidado con las uniones ya que cualquier imperfección facilitara el filtrado del agua y con ello el futuro desprendimiento de las placas. En ocasiones se sueldan estas uniones, lo que no es recomendable ya que el calor emitido podría afectar al epóxico. Por otra parte en ocasiones estas placas se unen a la estructura mediante pernos, desgraciadamente existen aún en la actualidad, grandes incertidumbres respecto a la transmisión de los esfuerzos mediante estos dispositivos de la estructura a la placa de acero.

Los elementos laminados de fibras de carbono es la tercera técnica analizada en este trabajo. Esta técnica tiene numerosas ventajas en cuanto a su proceso constructivo, ya que a diferencia de la colocación de placas de acero adheridas mediante resinas epóxicas, los elementos de fibras de carbono presentan poca densidad y un esfuerzo a la ruptura 5 veces mayor al acero estructural utilizado en las placas de acero estructural, lo que permite una mayor maniobrabilidad de estos elementos respecto a la de las placas de acero. Razón por la cual en esta técnica, no se necesitan de obras falsas muy complicadas. Otra de las ventajas que tiene esta técnica, es que debido a la facilidad de instalación de este refuerzo, agiliza el termino de los trabajos, teniendo un programa de trabajo bastante mas reducido que para el refuerzo con presfuerzo adicional externo.

Posteriormente de realizar un análisis de los proyectos tipo para superestructuras de puentes carreteros (SAHOP,1963) con losas con dos nervaduras de concreto reforzado, se encuentran en buen estado y aún presentan una resistencia remanente considerable. Sin embargo si se considera que estas losas han sido dañadas por efectos ambientales y si de igual forma, se considera que la fila más exterior de acero ha sido afectada por corrosión los resultados son los siguientes: Para las losas con claros mayores a 23 m no existe preocupación alguna ya que su nivel de fluencia está muy lejos de los esfuerzos presentados en la actualidad. Sin embargo para los claros menores o iguales a 23 m se están presentando esfuerzos mayores al valor de fluencia del acero; recordemos que para estos claros se utilizaron acero A40, con un valor máximo de fluencia de 2300 kg/cm^2 .

Por lo anterior después de haber realizado este trabajo se propone que debe realizarse una inspección minuciosa para los puentes con losas de dos nervaduras de concreto reforzado, para claros menores de 23 m, con el objeto de verificar que no existan indicios de corrosión en el la fibra inferior del alma de cada nervadura, de lo contrario tendrá que valorarse y de ser necesario reforzar dichas losas. Se recomienda que dichas losas sean reforzadas mediante elementos laminados de fibras de carbono, ya que como se señaló en el capítulo 3 de este trabajo, los laminados de fibras de carbono son un método viable para estos fines. En los análisis las fibras de carbono presentaron esfuerzos muy por debajo de su esfuerzo de ruptura y tienen una capacidad remanente de más del 80 % de su valor permisible. Razón por la cual resultan sumamente recomendables.

Entre los objetivos de este trabajo, independientemente de mostrar técnicas avanzadas para el refuerzo de superestructuras para puentes carreteros, es el exhortar a todos los ingenieros dedicados a la ingeniería de puentes a poner

énfasis en los aspectos relacionados a conservación de puentes, ya que el reforzar un puente no es una cuestión aislada, sino que es producto de un sistema de valoración y análisis de toda una ficha clínica de un puente, en la cual se consignan todas y cada una de las características (de diseño, construcción, materiales, ubicación, eventualidades, etc) que pudiese sufrir un puente. En este sentido la invitación es motivar a los ingenieros de puentes a despertar una cultura del mantenimiento y conservación de estas estructuras. Ya que como se indica en la introducción de este trabajo, las estructuras de puentes distan mucho de ser eternas y necesitan estar sujetas a inspecciones y evaluaciones periódicas.

BIBLIOGRAFÍA

1. **AASHTO**, *Load Resistance Factor Design*, American Association of Highway and Transportation Officials, USA, 1996.
2. **Calder, A. J.J.**, *Adhesion and durability aspects of bonded joints*, PhD Thesis, University of Dundee, 1986.
3. **Carmonilla, D.J.**, *Mantenimiento y pequeñas reparaciones en puentes*, presentado en: Simposio sobre Conservación, Rehabilitación y Gestión de Puentes, Madrid, 1991.
4. **Chatelaini, Chaussin, Coste y Poineu**, *La reparación de Puentes de hormigón pretensado*, presentado en: Simposio sobre Conservación, Rehabilitación y Gestión de Puentes, Madrid, 1991.
5. **Clarke J.L.**, *Alternative materials for the reinforcement and prestressing of concrete*, Blackie & Profesional, Glasgow U.K., 1993
6. **Del Pozo Frutos, F.**, *Reparación y refuerzo de puentes*, presentado en: Simposio sobre Conservación, Rehabilitación y Gestión de Puentes, Madrid, 1991.
7. **Fregoso Vásquez. A.**, *Manual de inspección y calificación de puentes*, Subdirección de Estudios y Proyectos, Dirección General de conservación de carreteras, Subsecretaria de Infraestructura, México, 1985.
8. **Fregoso Vásquez. A.**, *Introducción a la patología estructural y conservación de puentes*, Subdirección de Estudios y Proyectos, Dirección General de conservación de carreteras, Subsecretaria de Infraestructura, México, 1982.
9. **Fyfe R., Gee D., Milligan P.**, *Composite Systems for Seismic Applications*, Concrete International Magazine, ACI, USA, 1998.
10. **Garden G.R., Holloway, L.C.**, *A parameteric study of the strengthening of reinforced concrete beams with bonded composites*. Memorias de la conferencia Bridge Modiffication, United Kingdom, 1994.
11. **Ladner, M. & Weder, Ch.**, *Concrete Structures with bond external reinforcement*, Material Science and Technology Volume I, 1985.
12. **Henwood A.M. & O'Connell K.M.**, *The use of externally bonded steel plates to strengthen Bolney Flyover*, Bridges Management 2, United Kingdom, 1993.

13. **Hutchinson, A.R.**, *Adhesion and durability aspects of bonded joints*, PhD Thesis, University of Dundee, 1986.
14. **Lane J.S., Leeming. M.B.**, *A Robust Solution of Strengthening Bridges*, Memorias del Mouchel Centenary Conference, Reino Unido, 1997.
15. **Keller R., Thomas T.**, *Towards Structural Forms for Composite Fibre Materials*, Structural Engineering International, Volume 9, Nov. 1999.
16. **King Delgado. A.**, *Alternativas de refuerzo para superestructuras de puentes carreteros*, Congreso nacional de estructuras (SMIE), Monterrey, Nuevo León, 1998.
17. **Manterola Armisén. J. F.**, *Criterios de evaluación del estado de los puentes*, presentado en: Simposio sobre Conservación, Rehabilitación y Gestión de Puentes, Madrid, 1991.
18. **Mallet G.P.** *Repair of Concrete Bridges*, Transport Research, United Kingdom, 1992.
19. **Mays, G.C.**, *Structural application of adhesives in Civil Engineering*, Materials Science and Technology, Volume I, 1985.
20. **Master Builders**, *Mbrace Composite Strenghtening System*, manual técnico, USA. 1997.
21. **Meier U., Deuring M., Meier H. Y Schwelger G.**, *Strengthening Structures with CFR laminates: Research and Aplicattions in Switzerland*, *Composite Materials in bridge and Structures*, Canadian Society for Civil Engineering, Canadá, 1992.
22. **Nanni A, Gold W.**, *Strengh Assesment of External FRP Reinforcement*, Concrete International Magazine, ACI, USA, 1998.
23. **Raithby K.D.**, *External strengthening of concrete bridges with bonded steel plates*. Supplementary report 612, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, United Kingdom, 1980.
24. **Shaw. M.** *Strengthening bridges with externally bonded reinforcement*, Bridge Management 2, United Kingdom, 1993.