



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA (PUEI)
ESPECIALIDAD EN ESTRUCTURAS**

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**“REFUERZO ESTRUCTURAL CON POLÍMEROS
REFORZADOS CON FIBRAS (PRF)”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

ROGELIO ESPINOZA ROJAS

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ



México, CDMX., Marzo de 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Carlos Javier Mendoza Escobedo
Secretario: M.I. Miguel Ángel Zúñiga Bravo
Vocal 1: Dr. José Alberto Escobar Sánchez
Vocal 2: M.I. Héctor Javier Guzmán Olguín
Vocal 3: M.I. Octavio García Domínguez

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ALBERTO ESCOBAR SÁNCHEZ

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta el reforzamiento estructural de columnas pertenecientes a un distribuidor vial, para dicho reforzamiento se consideró el sistema de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF). Se evalúa la capacidad de carga de las columnas antes y después de aplicar el refuerzo. El objetivo fue que las columnas recuperaran al menos su capacidad de diseño. Además, este documento contiene información que podría utilizarse como guía para el cálculo y uso de sistemas de refuerzo con PRF. Se presentan criterios y consideraciones de la “Guía para el Diseño y Construcción Sistemas con PRF para el Fortalecimiento de Estructuras de Concreto” (ACI 440.2R-08) para el uso del sistema de refuerzo de PRF. También contiene recomendaciones del proceso constructivo de este tipo de refuerzo. Además, se muestra la solución de problemas de aplicación práctica utilizando el sistema de PRF. Adicionalmente, se presentan problemas de refuerzo con PRF para cubrir demandas a flexión, carga axial y cortante.

CONTENIDO

RESUMEN.....	III
CONTENIDO.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (PRF).....	2
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. COMPONENTES DE LOS PRF	2
1.2.1. Fibra de vidrio.....	2
1.2.2. Fibra de carbono.....	3
1.2.3. Fibra de aramida.....	3
1.2.4. Resinas.....	4
CAPÍTULO 2 MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	5
2.2. CONSIDERACIONES GENERALES.....	5
2.3. INSTALACIÓN.....	6
CAPÍTULO 3 REFUERZO CON EL SISTEMA DE PRF.....	8
3.1. CONSIDERACIONES GENERALES.....	8
3.2. REFUERZO ESTRUCTURAL CON PRF.....	9
3.2.1. Cortante.....	9
3.2.2. Flexión.....	12
3.2.3. Carga axial.....	17
3.2.4. Flexo-compresión.....	19
CAPÍTULO 4 REFUERZO DE COLUMNAS CON PRF.....	21
4.1. REFUERZO A CORTANTE EN CAPITELES.....	21
4.2. REFUERZO A FLEXO-COMPRESIÓN EN COLUMNAS.....	23
4.2.1. Cálculo de la capacidad de carga de las columnas.....	23
4.2.2. Cálculo de la capacidad de carga de las columnas agrietadas.....	23
4.2.3. Cálculo de la capacidad de columnas reforzadas con PRFC.....	29
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	40
APÉNDICE A	41

INTRODUCCIÓN

El deterioro de las estructuras se puede dar de manera natural o por la acción de cargas no previstas. Desde el punto de vista de la seguridad estructural es de especial interés el daño ocasionado en elementos estructurales, pues de la integridad de estos depende la de la estructura. Una de las formas para rehabilitar elementos estructurales consiste en la utilización de sistemas de refuerzo con PRF. Este tipo de refuerzo es utilizado de manera frecuente debido, principalmente, a facilidad de su aplicación. Además el sistema de PRF se puede utilizar en la rehabilitación de elementos estructurales.

Cabe aclarar que si se pretende realizar una rehabilitación, el sistema no puede utilizarse si el elemento que será reforzado no cuenta con una capacidad de carga mínima para evitar el colapso. El ACI 440.2R-08 no recomienda el sistema PRF como refuerzo principal para elementos sometidos a carga axial. Sin embargo, sí considera la participación del refuerzo en la capacidad de carga axial mediante el confinamiento.

En México, el sistema PRF es utilizado ya que representa una opción rentable para reforzar estructuras con daño o sin él. El costo del sistema es elevado, sin embargo, los beneficios son inmediatos pues el proceso de colocación es relativamente rápido. El sistema de PRF es utilizado en elementos estructurales principalmente como refuerzo adicional, posterior a un daño o cambio de uso.

En este documento se presenta el procedimiento y criterios básicos que se deben tener en cuenta cuando se pretenda reforzar algún elemento con el sistema de PRF. Es importante mencionar que este documento está basado en la guía ACI 440.2R-08. Se mencionan las consideraciones generales y pasos a seguir para aplicar el sistema PRF de manera correcta.

El tema central de este trabajo es la reparación de columnas pertenecientes a un puente vehicular, las columnas presentan agrietamiento excesivo. Se propone un criterio para evaluar la capacidad de carga a flexo-compresión de columnas con agrietamiento. Además, se presenta el cálculo del refuerzo utilizando PRF con fibra carbono.

Así en el capítulo 1 se mencionan los tipos de fibras utilizadas en el sistema de PRF y las propiedades aproximadas de las mismas.

El capítulo 2 recopila consideraciones generales sobre la instalación del refuerzo con PRF.

El capítulo 3 presenta ecuaciones básicas para calcular el refuerzo de elementos con PRF.

En el capítulo 4 se presenta el procedimiento y las consideraciones que se utilizaron para reforzar y evaluar la capacidad de columnas con daño.

Además, en el apéndice “A” se muestran ejemplos de refuerzo con PRF. Entre los casos analizados se presentan elementos que necesitan cubrir demandas adicionales a cortante, flexión, carga axial y flexo-compresión.

CAPÍTULO 1

POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (PRF)

1.1. ANTECEDENTES

Los estudios experimentales del sistema de refuerzo con PRF comenzaron en Alemania en 1978 (Wolf y Miessler, 1989). La primera vez en la que se utilizó el refuerzo de PRF en estructuras de concreto fue en Japón en 1980 (Fardis y Khalili 1981, Katsumata et al., 1987) utilizándolo como un sistema de confinamiento.

El sistema de refuerzo con PRF es utilizado como refuerzo de elementos estructurales principalmente en procedimientos de reparación de elementos con daño reparable. El ACI 440.2R-08 plantea que el refuerzo se realice siempre y cuando no se comprometa la integridad de la estructura. En la actualidad existen numerosos fabricantes de fibras, cada uno de ellos comercializa productos de distintas características. Sin embargo, los productores garantizan la calidad necesaria para cumplir con distintas normativas. Es debido a esto que en el presente trabajo se aborda de manera general la utilización de PRF como refuerzo estructural.

1.2. COMPONENTES DE LOS PRF

De la misma manera que el ingeniero estructurista conoce las propiedades de materiales como el concreto, acero o la madera, también es importante que conozca los materiales compuestos como son los PRF. Son materiales formados por dos componentes, la matriz y las fibras. Las fibras son producidas a partir de filamentos de materia prima, las fibras más utilizadas en este tipo de refuerzo son la fibra de vidrio, aramida (poliamidas aromáticas) y la fibra de carbono. La matriz usualmente es una resina cuya función es distribuir esfuerzos entre la estructura y la fibra. La resina también protege a las fibras de los daños mecánicos y ambientales. Se pueden utilizar tres tipos de resinas poliméricas como matriz. Las resinas más utilizadas son resina polyester, resinas vinil y resinas epóxicas dependiendo del caso y las especificaciones del fabricante.

Dentro de estos materiales la fibra de carbono es la más utilizada debido a su disponibilidad y a que sus propiedades mecánicas son apropiadas para utilizarse como refuerzo estructural. Si bien la fibra de carbono es relativamente cara, su versatilidad hace que este material sea el más utilizado.

1.2.1 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es un material que consta de numerosos filamentos poliméricos basados en el dióxido de silicio. La fibra se conforma de hebras delgadas hechas a base de sílice. Generalmente se utiliza como material aislante, la fabricación de este tipo de fibra requiere altas temperaturas. Químicamente, la fibra de vidrio está compuesta a base de dióxido de sílice SiO_2 . Es importante mencionar que la fibra de vidrio presenta una estructura amorfa, lo que hace que el material se comporte isotrópicamente. Factores como la humedad pueden provocar una disminución de sus propiedades mecánicas. En la tabla 1.1 se presentan valores representativos de las propiedades mecánicas de las fibras de vidrio, se incluye el vidrio de grado S (vidrio estructural o de alta resistencia) utilizado para fibras de alto rendimiento (ACI 440.2R-08).

Tabla 1.1 Propiedades de las fibras de vidrio de diferentes grados (ACI 440.2R-08)

Grado de la fibra de vidrio	Densidad g/cm ³ (lb/in ³)	Módulo de elasticidad GPa (Msi)	Resistencia a la tensión MPa (ksi)	Deformación unitaria máxima (%)
E	2.57 (0.093)	72.5 (10.5)	3400 (493)	2.5
A	2.46 (0.089)	73 (10.6)	2760 (400)	2.5
C	2.46 (0.089)	74 (10.7)	2350 (10.7)	2.5
S	2.47 (0.089)	88 (12.8)	88 (12.8)	3.0

1.2.2 Fibra de carbono

La fibra de carbono es una fibra sintética construida por filamentos de 5 a 10 μm de diámetro, cuyo compuesto principal es el carbono. La fibra tiene propiedades similares al acero, una de las características a destacar es su ligereza. Químicamente, la estructura de los filamentos de la fibra de carbono es similar a la del grafito. Sus propiedades principales son: resistencia mecánica elevada, baja densidad, resistencia a agentes externos, capacidad de aislamiento térmico y resistencia a variación de temperaturas. Las fibras de carbono tienen buen comportamiento ante cargas de fatiga, además de que no absorben humedad. Al igual que la fibra de vidrio, su producción se realiza a temperaturas elevadas. La producción se divide entre los grados de módulo estándar, módulo intermedio, resistencia alta y módulo ultra alto. En la tabla 1.2 se presentan propiedades típicas de las fibras de carbono de diferentes grados (ACI 440.2R-08).

Tabla 1.2 Propiedades de las fibras de carbono de diferentes grados (ACI 440.2R-08)

Grado de la fibra de carbono	Densidad g/cm ³ (lb/in ³)	Módulo de elasticidad GPa (Msi)	Resistencia a la tensión MPa (ksi)	Deformación unitaria máxima (%)
Estándar	1.7 (0.061)	250 (36.3)	3700 (537)	1.2
Alta resistencia	1.8 (0.065)	250 (36.3)	4800 (696)	1.4
Alto modulo	1.9 (0.068)	500 (72.5)	3000 (435)	0.5
Ultra alto modulo	2.1 (0.076)	800 (116.0)	2400 (348)	0.2

1.2.3. Fibra de aramida

La fibra de aramida, al igual que la fibra de carbono, es de origen sintético se obtiene por hilado de poliamidas aromáticas tipo politereftalato de polifenilendiamina. La aramida es de estructura químicamente rectangular lo que resulta en una considerable rigidez y alta resistencia. Las propiedades de la fibra son principalmente: alta resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia al impacto, baja resistencia a la flexión y compresión. Factores como el costo elevado, baja accesibilidad, alta absorción de humedad y temperaturas de fusión bajas han hecho a las fibras de aramida las menos atractivas para la ingeniería estructural. Algunas fibras aramida presentan una densidad de hasta 1.4 g/m³ (0.051 lb/in³) dependiendo del tipo de fibra. La resistencia a tensión de la fibra oscila entre 3400 y 4100 MPa (500 a 600 ksi) y el módulo de elasticidad entre 70 y 125 GPa (ACI 440.2R-08).

1.2.4. Resinas

Resinas poliméricas

El término se utiliza para describir una serie de macromoléculas en cadenas unidas mediante enlaces covalentes. La resina polimérica es la matriz o aglutinante del PRF es decir, la parte no fibrosa del compuesto. Las resinas suelen considerarse isotrópicas y materiales visco-elásticos. Además, la mayoría de las resinas son susceptibles a la degradación de la luz ultra violeta. En general, las resinas poliméricas no se recomiendan para aplicaciones en las que la temperatura exceda los 180° C. Por ello deberá tener sistemas de aislamiento que prevengan el daño en caso de incendios (ACI 440.2R-08).

Resina de poliéster insaturado

La resina poliéster es utilizada cuando se desea una mayor resistencia a la corrosión de los sistemas de PRF. Este tipo de resinas es el más utilizado para producir piezas de PRF. Se trata de un polímero insaturado en cuyos enlaces dobles las cadenas no están saturadas con átomos de hidrogeno. En general, las resinas poliéster poseen una alta versatilidad, lo cual les permite adaptarse a las diferentes necesidades (ACI 440.2R-08).

Resina epoxi

La resina epoxi puede ser utilizada como la matriz del PRF. Además, puede ser el adhesivo uniendo el PRF con el sustrato del elemento. La resina epoxi y el agente de curado (o endurecedor) se suministra por separado en dos partes, antes de la aplicación se mezclan en proporciones definidas por el fabricante. Debido a la versatilidad del material las resinas epoxicas pueden ser utilizadas como matriz del PRF o como adhesivo para otras aplicaciones (reparación de grietas o unión de elementos prefabricados). La densidad de la resina es aproximadamente 1.05 g/cm³. El proceso de curado de la resina puede realizarse a temperatura ambiente o temperaturas de transición vítrea para mejorar sus propiedades (ACI 440.2R-08).

Resinas vinilester

La resina vinilester es un polímero insaturado que se produce a partir de resina epoxi y éster acrílico. Se usa en la fabricación de varillas de PRF. Además, se utiliza como sustituto de la resina poliéster. La durabilidad ambiental en ambientes alcalinos es una de sus principales características, además de poseer propiedades semejantes a las resinas epoxi y resinas poliéster.

En el mercado nacional, existe una extensa variedad de resinas para su uso en sistemas de PRF, en la tabla 1.3 se presentan las propiedades aproximadas de resinas poliméricas termoestables (ACI 440.2R-08).

Tabla 1.3 Propiedades de resinas termoestables (ACI 440.2R-08).

Resina	Densidad g/cm ³ (lb/in ³)	Módulo de elasticidad GPa (Msi)	Resistencia a la tensión MPa (ksi)	Deformación unitaria máxima (%)
Poliéster	1.2 (0.043)	4.0 (0.58)	65 (9.4)	2.5
Epoxi	1.2 (0.043)	3.0 (0.44)	90 (13.1)	8.0
Vinilester	1.12 (0.041)	3.5 (0.51)	82 (11.9)	6.0
Fenolico	1.24 (0.045)	2.5 (0.36)	40 (5.8)	1.8
Poliuretano	variable	2.9 (0.42)	71 (10.3)	5.9

CAPÍTULO 2

MÉTODO CONSTRUCTIVO

Este capítulo trata, de manera general, las consideraciones que deben tenerse para el manejo y la utilización de materiales compuestos como son los PRF. Debido a que el proceso de instalación de los PRF puede variar dependiendo del fabricante y el material utilizado, solo se hacen recomendaciones generales. Las consideraciones generales y de instalación están son las presentadas en el (ACI 440.2R-08).

2.2. CONSIDERACIONES GENERALES

Los materiales deben almacenarse de acuerdo con las recomendaciones de fábrica. Para materiales como agentes de curado, resinas, catalizadores y agentes de limpieza, deberán atenderse los requisitos de seguridad indicados para cada producto.

Debe tenerse cuidado especial con las resinas, ya que con el paso del tiempo, las propiedades de sus componentes pueden cambiar. Esto afecta directamente en el comportamiento del PRF. Cualquier material que haya sido alterado o contaminado deberá evitarse. Debe prestarse atención pues no deberán utilizarse materiales fuera de su fecha de caducidad. El desecho de materiales contaminados debe realizarse bajo la supervisión de las autoridades competentes.

En cuanto al manejo de los materiales constitutivos del PRF, deberá contarse con información acerca de materiales potencialmente peligrosos. Los especialistas habrán de tener conocimiento sobre los materiales que están manejando en el caso de las resinas termo-endurecibles deberán tener en cuenta lo siguiente (ACI 440.2R-08):

- Pueden provocar irritación, quemaduras, erupciones cutáneas, picazón, sensibilidad en la piel o reacciones alérgicas.
- Evitar la respiración de vapores provenientes de los disolventes de limpieza.
- Evitar lugares cerrados debido a que la concentración de gases o materiales inflamables puede ocasionar explosiones o fuego.
- Las reacciones exotérmicas al momento de la mezcla pueden provocar lesiones.
- El etiquetado con leyendas que indiquen las condiciones en las que deben manejarse los materiales es de gran importancia.

El contratista debe contar con el material adecuado para la manipulación de las fibras y resinas. Se recomienda guantes de goma o de plástico desechables. Este equipamiento no puede ser reutilizado. Los guantes deben resistir el contacto con resinas y disolventes. Además deberá contarse con gafas de seguridad en especial al manejar disolventes. Debe contarse con máscaras que protejan las vías respiratorias ya que durante el proceso se pueden desprender gases, polvo o fragmentos de fibra. Se recomienda que el lugar de trabajo cuente con buena ventilación, además deberán protegerse superficies para evitar derrames accidentales. Cada componente del PRF tiene diferentes requisitos de almacenamiento, en caso de no conocerlos deberá contactarse al fabricante. Los procedimientos de

mezclado de las resinas deberán seguirse al pie de la letra de acuerdo a lo especificado por el fabricante. El proceso de curado de las resinas produce calor que puede llevar a reacciones no controladas como son: generación de humo, incendios o ebullición violenta en los recipientes contenedores de la resina.

2.3. INSTALACIÓN

Los procedimientos de instalación de los sistemas de PRF suelen variar entre fabricantes, además de esto también pueden variar dependiendo del tipo y condición de la estructura. En dado caso los contratistas deberán estar capacitados en los procedimientos específicos desarrollados por los fabricantes. Es importante no desviarse de los procedimientos de instalación desarrollados por el fabricante en caso de hacerlo se debe consultar con el fabricante.

La temperatura y humedad pueden afectar el rendimiento del PRF, las condiciones que deben monitorearse durante la instalación son la temperatura, humedad relativa y humedad superficial del concreto. No es recomendable aplicar las resinas cuando el concreto presenta temperaturas de congelación. Se debe evitar saturar las fibras y permitir el curado adecuado de las resinas. Para llevar a cabo la instalación en ambientes fríos es posible elevar la temperatura con alguna fuente siempre y cuando no se dañe la superficie o los materiales constituyentes del PRF. Se debe garantizar la adherencia entre el concreto y el PRF (ACI 440.2R-08).

Algunos fabricantes cuentan con equipo especializado para instalar el PRF, en estos casos deberá cuidarse que todo el equipo este en buenas condiciones. Además los operadores deben contar con equipo de protección como lo son guantes, máscaras, etc.

Los sistemas de refuerzo con PRF dependen en gran medida de la adherencia que tienen con la superficie del concreto. Debido a esto el proceso de preparación de la superficie se debe realizar adecuadamente. Una preparación inadecuada de la superficie puede provocar el desprendimiento o de laminación del PRF. Se debe evitar reforzar elementos cuyo acero de refuerzo este corroído ya que las fuerzas de expansión ocasionadas por este fenómeno pueden comprometer el PRF. Al reforzar elementos con agrietamiento con un ancho de grieta mayor a 0.3 mm deberá realizarse una inyección de resina epoxi antes de la instalación del PRF (ACI 440.2R-08).

Unión entre el PRF y la superficie del concreto, el tipo de unión dependerá del tipo de refuerzo, por ejemplo el refuerzo a flexión y cortante en vigas o losas requieren de una unión adhesiva entre el PRF y el concreto (Enlace crítico). El confinamiento de columnas únicamente requiere de un contacto íntimo entre el PRF y el concreto, es decir no se requiere una unión adhesiva entre el concreto y el PRF (Contacto crítico), sin embargo el uso de adhesivos facilita la instalación (ACI 440.2R-08).

En general la preparación de la superficie consiste en eliminar de impurezas, polvo, elementos incrustados y aplanados que interfieran el contacto directo del PRF con el concreto. En caso de que la superficie presente agujeros estos deberán resanarse con algún material con propiedades similares a las del concreto existente. Las protuberancias fuera del plano de la superficie pueden eliminarse. La aplicación del PRF debe realizarse en seco, el agua atrapada en los poros del concreto puede inhibir la penetración de la resina y de esta manera reducir la adherencia del PRF.

La mezcla de resinas debe realizarse de acuerdo con el procedimiento recomendado por el fabricante del PRF, debe cuidarse la dosificación y temperatura de las resinas. Usualmente los componentes de la resina tienen colores contrastantes por lo que es fácil apreciar cuando los componentes están

correctamente mezclados. La resina debe mezclarse en cantidades necesarias que se vayan a utilizar, esto evitara el desperdicio de material.

Al aplicar el PRF sobre la superficie debe esperarse el curado de las resinas aplicadas en la preparación de la superficie. Las fibras pueden aplicarse impregnándolas de resinas saturantes antes de la colocación o pueden colocarse y después e impregnarlas al momento de su instalación. Las fibras se deben presionar suavemente sobre la superficie del concreto, debe cuidarse que no quede aire atrapado entre capas. Las fibras debe ser correctamente alineadas inclinaciones entre de tan solo 5 grados pueden provocar una disminución sustancial de la resistencia del sistema. Cuando se coloque múltiples capas de PRF se debe buscar que los empalmes sean escalonados recomendaciones como estas deben ser proporcionadas por el fabricante (ACI 440.2R-08).

El curado de las resinas puede variar dependiendo de la temperatura ambiental, para alcanzar el curado completo se necesitan de varios días dependiendo claro del tipo de resina. Temperaturas fluctuantes pueden retrasar o acelerar el curado de las resinas. Al colocar capas sucesivas de refuerzo debe esperarse que la capa anterior este totalmente curada. En caso de que se detecte alguna anomalía en el curado de las resinas debe detenerse el proceso de colocación de capas adicionales. Las resinas deben protegerse durante el proceso de curado condiciones como una alta humedad, excesiva luz solar, lluvia, polvo, suciedad o el vandalismo puede dañar el sistema de PRF (ACI 440.2R-08).

CAPÍTULO 3

REFUERZO CON EL SISTEMA DE PRF

3.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Las consideraciones aquí presentadas atienden a las mencionadas en el informe (ACI 440.2R-08). Los sistemas de refuerzo deben diseñarse para resistir la fuerza a tracción manteniendo la compatibilidad de deformaciones entre el PRF y el concreto. La filosofía de diseño se basa en estados límite de servicio y resistencia.

El elemento reforzado debe tener una resistencia mínima para que, en caso de fallar el PRF, la estructura sea capaz de resistir un nivel razonable de carga sin colapso. Esto se logra si se cumple la ecuación.

$$(\phi R_n)_{existente} \geq (1.1S_{DL} + 0.75S_{LL})_{nuevo} \quad 3.1$$

donde:

Tanto las cargas vivas como las muertas usadas en la ecuación 1.1 deben ser las aquellas a las que estará sujeto el elemento después de ser reforzado con PRF. Si el total de la carga viva actúa durante periodos prolongados de tiempo, el valor 0.75 se debe tomar como 1.

Las resinas son susceptibles al daño ocasionado por temperaturas elevadas de 60 a 82° C. La degradación de las resinas afecta el funcionamiento del PRF por la pérdida de adherencia entre el concreto y el PRF. Esta es la razón por la cual se debe garantizar que el elemento resista al menos las cargas de servicio. Para este caso, los coeficientes de la ecuación 3.1 deben tomarse como 1.

Las propiedades más importantes para calcular el refuerzo con PRF son:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad 3.2$$

donde:

f_{fu} : es la resistencia última a tensión del PRF con fines de diseño

C_E : es un factor de reducción ambiental que depende de las condiciones de exposición del elemento

f_{fu}^* : es la resistencia última a tensión del PRF proporcionada por el fabricante

$$\epsilon_{fe} = C_E \epsilon_{fu} \quad 3.3$$

donde:

ϵ_{fe} : es la deformación unitaria de diseño

C_E : es un factor de reducción ambiental que depende de las condiciones de exposición del elemento

ϵ_{fu} : es la deformación unitaria de ruptura proporcionada por el fabricante

$$E_f = f_{fu} / \epsilon_{fu} \quad 3.4$$

donde:

- E_f : es el módulo de elasticidad a tensión del PRF proporcionado por el fabricante
- f_{fu} : es un factor de reducción ambiental que depende de las condiciones de exposición del elemento
- ϵ_{fu} : es la deformación unitaria de ruptura proporcionada por el fabricante

El módulo de elasticidad del PRF no se ve afectado por factores ambientales. Para fines de diseño deberá tomarse el valor proporcionado por el fabricante.

3.2. REFUERZO ESTRUCTURAL CON PRF

3.2.1 Cortante

Al envolver un elemento con PFR, se mejora su resistencia a cortante. El refuerzo debe proporcionarse de manera que las fibras estén orientadas transversalmente al eje longitudinal y debe envolver al elemento (parcial o completamente). Existen tres formas diferentes para proporcionar el refuerzo las cuales se muestran en la figura 3.1. La configuración del refuerzo que se desee adoptar dependerá de las necesidades del proyecto. No se recomienda que el refuerzo envuelva completamente el elemento debido a que puede atrapar humedad y esto, aunado a condiciones ambientales, podría ocasionar daños. En la tabla 3.1 se presentan los factores de reducción recomendados para el diseño a cortante del refuerzo PRF.

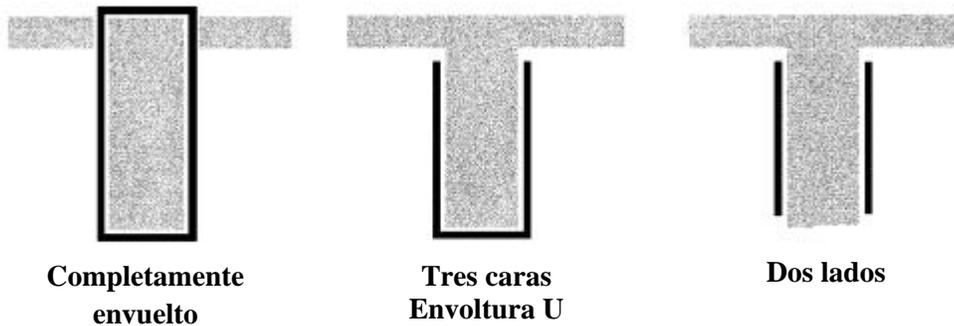


Figura 3.1. Configuración del refuerzo (PRF) a cortante en vigas de concreto (ACI 440.2R-08)

Tabla 3.1. Factores de reducción para el refuerzo PFR (ACI 440.2R-08)

$\Psi_f = 0.95$	para miembros completamente envueltos
$\Psi_f = 0.85$	Para miembros cubiertos en dos y tres lados

La fuerza cortante obtenida con el refuerzo del PRF debe exceder el cortante requerido

$$\phi V_n \geq V_u \quad 3.5$$

donde:

En el cálculo de la resistencia a cortante se incluye la aportación del PRF de manera que ϕV_n es:

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad 3.6$$

donde:

- V_c : es el cortante resistido por el concreto
- V_s : es el cortante resistido por el acero transversal
- V_f : es el cortante resistido por el PRF
- ψ_f : es el factor de reducción el cual puede ser igual a 0.85 y/o 0.95

La aportación del PRF a la resistencia del elemento se calcula como:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad 3.7$$

donde:

- A_{fv} : es el área del refuerzo a cortante del PRF
- f_{fe} : es la tensión efectiva del PRF
- d_{fv} : es la profundidad efectiva del refuerzo a cortante del PRF
- s_f : es la separación de las fibras medida al centro entre una lámina y otra

A_{fv} se calcula como:

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad 3.8$$

donde:

El esfuerzo desarrollado por el PRF se puede calcular con:

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad 3.9$$

donde:

Deformación unitaria efectiva en el PRF

La deformación efectiva es la máxima deformación que alcanza el PFR al fallar. Para su diseño se deberán evaluar los distintos modos de falla del elemento, de esta manera se utilizará la condición más crítica.

Para miembros completamente envueltos, columnas o trabes, se tomará una deformación efectiva igual a 0.4 % es decir:

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu} \quad 3.10$$

En el caso de que el refuerzo este proporcionado en dos y tres caras del elemento, deberá utilizarse la ecuación (3.3) con un factor de reducción k_v para el refuerzo a cortante. Entonces:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad 3.11$$

donde:

k_v : es un coeficiente de reducción por adherencia y está en función de la resistencia del concreto se calcula como:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{468 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (\text{en Pulgadas y libras}) \quad 3.12$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (\text{en SI}) \quad 3.13$$

donde

L_e : es la longitud adherida en la cual se concentran los esfuerzos se calcula como:

$$L_e = \frac{2500}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad (\text{en Pulgadas y libras}) \quad 3.14$$

$$L_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}} \quad (\text{en SI}) \quad 3.15$$

El coeficiente k_v depende de dos valores k_1 y k_2 . El primero corresponde a la resistencia del concreto, el segundo al tipo de envoltura del refuerzo. Se calculan como:

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{4000}\right)^{2/3} \quad (\text{en Pulgadas y libras}) \quad 3.16$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3} \quad (\text{en SI}) \quad 3.17$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \quad \text{para configuraciones en tres caras} \quad 3.18$$

$$k_2 = \frac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} \quad \text{para configuraciones en dos caras} \quad 3.19$$

Separación

Se recomienda que las separaciones atiendan lo establecido en el (ACI 318-05). Además la guía ACI 440.2R-08 sugiere que la separación máxima no exceda la suma del ancho del PRF más $d/4$.

Longitud de desarrollo

Para que el PRF desarrolle su esfuerzo de fluencia es necesario anclarlo una distancia igual o mayor a la dada por la ecuación:

$$l_{df} = 0.0057 \sqrt{\frac{n E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (\text{en Pulgadas y libras}) \quad 3.20$$

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (\text{en SI}) \quad 3.21$$

Límites del refuerzo

El ACI establece límites máximos en la contribución del PRF y el acero a la resistencia a cortante. Estos límites están basados en los establecidos en el ACI 318-05 sección 11.5.6.9, las ecuaciones que limitan el refuerzo son:

$$V_s + V_f \leq 8 \sqrt{f'_c b_w d} \quad (\text{en Pulgadas y libras}) \quad 3.22$$

$$V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c b_w d} \quad (\text{en SI}) \quad 3.23$$

3.2.2. Flexión

La unión del refuerzo FRP en la cara de tensión de un elemento de concreto sujeto a flexión, proporciona un aumento a la resistencia a flexión, siempre y cuando, las fibras estén colocadas en dirección longitudinal al elemento. Dependiendo de la cantidad de refuerzo, la resistencia se incrementara entre 10 a 160 % de acuerdo con límites de fortalecimiento, ductilidad y servicio. Se recomienda que el incremento de resistencia de un elemento a flexión sea alrededor de un 40 %. La ecuación general de diseño por flexión (ACI 318-05) es:

$$\phi Mn \geq Mu \quad 3.20$$

donde:

Mu : es el momento calculado a partir de cargas factorizadas

ϕMn : es el momento nominal multiplicado por un factor de reducción de la fuerza

Para el refuerzo de elementos a flexión deberá incluirse un factor de reducción Ψ_f adicional el cual se utiliza para mejorar el comportamiento del refuerzo.

Al reforzar elementos sometidos a flexión, se deberán considerar los posibles modos de falla:

- Aplastamiento del concreto en la zona de compresión antes de la falla por fluencia del acero de refuerzo
- Falla por fluencia del acero de refuerzo seguida por la ruptura de la lámina de PRF
- Falla por fluencia del acero de refuerzo seguido por la falla a compresión del concreto
- Falla por desprendimiento del recubrimiento de concreto a tensión y/o a cortante
- Falla por desprendimiento del PRF

El refuerzo de FRP debe limitarse al nivel de deformación en el cual se presenta desprendimiento de la fibra debido al agrietamiento del concreto, dicha deformación unitaria (ACI 440.2R-08) es:

$$\varepsilon_{fd} = 0.083 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (\text{en Pulgadas y libras}) \quad 3.21$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (\text{en SI}) \quad 3.22$$

donde:

n : es el número de láminas de PRF

t_f : es el espesor de una lámina de PRF

E_f : es el módulo de elasticidad del PRF

La deformación efectiva en el refuerzo PRF, una vez esta adherido a la superficie de tensión del elemento, se calcula como (ACI 440.2R-08):

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad 3.23$$

donde:

- ε_{bi} : es la deformación inicial presente en la superficie antes de adherir la lámina de PRF
- ε_{cu} : es el módulo de elasticidad del concreto
- c : es la distancia desde la fibra extrema a compresión al eje neutro
- d_f : es la distancia desde la fibra extrema a compresión al centroide de la lámina PRF

Para el diseño del refuerzo a flexión se consideran las siguientes hipótesis:

- Las deformaciones en el acero y el PRF son proporcionales a la distancia que las separa del eje neutro, la sección permanece plana antes y después de la carga.
- No hay deslizamiento entre el PRF y el concreto.
- Se desprecia la deformación por cortante.
- El PRF presentan un comportamiento elástico lineal hasta alcanzar su falla.
- El concreto se aplasta a un deformación unitaria de 0.003.
- Se desprecia la resistencia a tensión del concreto.
- La falla del PRF se alcanza cuando $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$ antes de que el concreto alcance su tensión máxima.

Si bien estas suposiciones no reflejan el comportamiento real del PRF a flexión, se adoptan para facilitar los cálculos. Para compensar estas discrepancias se adiciona un factor de reducción que se menciona más adelante.

Cuando se utiliza el refuerzo PRF para incrementar la resistencia a flexión debe verificarse que la sección transversal del elemento estructural sea capaz de resistir el cortante asociado con el aumento a la resistencia a flexión. Esto se hará comparando la resistencia de la sección con el cortante requerido. En caso de que la sección no sea capaz de resistir la fuerza cortante deberá proporcionarse refuerzo PRF de acuerdo a la sección 3.3.1.

Factor de reducción de la resistencia

El uso de sistemas PRF para reforzar elementos a flexión, provoca una disminución en la ductilidad del elemento reforzado. Esto debe ser compensado manteniendo suficiente ductilidad en dicho elemento, debido a esto, las deformaciones unitarias del acero a tensión, deberán ser al menos de 0.005 una vez que falle el concreto y/o el PRF. El factor ϕ se calcula considerando el valor de las deformaciones unitarias en el acero de tensión, (ACI 318-05) como:

$$\phi = \left\{ \begin{array}{l} 0.90 \text{ para } \varepsilon_t \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} \text{ para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0.005 \\ 0.65 \text{ para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{array} \right\}$$

donde:

- ε_t : es la deformación unitaria del acero a tensión
- ε_{sy} : es la deformación unitaria de fluencia del acero

Condiciones de servicio

Es posible evaluar los efectos que tendrá el PRF sobre la capacidad de servicio utilizando la sección transformada. Para ello se deberán evitar las deflexiones y el agrietamiento excesivo de acuerdo con lo dispuesto en el (ACI 318-05). En elementos de concreto reforzado deberá limitarse el valor de los esfuerzos ante carga de servicio, de tal manera que se eviten deformaciones inelásticas. El esfuerzo bajo carga de servicio en el acero de tensión deberá limitarse al 80 %. Mientras que el esfuerzo a compresión del concreto se limitará al 45 % de la resistencia a compresión del concreto. Es importante mencionar que en elementos de concreto reforzado sin acero pretensado y con cargas de servicio cíclicas se deberá evitar el refuerzo con PRF (ACI 440.2R-08).

Acero a tensión:

$$f_{s,s} \leq 0.80f_y \quad 3.24$$

Concreto:

$$f_{c,s} \leq 0.45f'_c \quad 3.25$$

Límite de fatiga y límite de ruptura

Los materiales PRF sometidos a carga constante pueden fallar súbitamente después de cierto periodo de tiempo. A este tiempo se le llama tiempo de resistencia. A este tipo de falla se le denomina fluencia de ruptura y sucede a esfuerzos menores que los de su resistencia última. Este tipo de falla se puede acentuar dependiendo de las condiciones ambientales y el esfuerzo al que esté sometido el PRF. La falla por fatiga también se presenta en valores de esfuerzo menores que el de su resistencia última. La falla por ruptura se presenta bajo carga sostenida a través del tiempo. Los efectos de cargas cíclicas y factores ambientales pueden propiciar la falla por ruptura.

Para evitar esta falla por fatiga y por ruptura, el ACI 440. 2R establece límites para los esfuerzos en los diferentes tipos de PRF. En la tabla se presentan los esfuerzos límite en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Esfuerzos límite (ACI 440. 2R)

	PRF (Fibra de vidrio)	PRF (Fibra de aramida)	PRF (Fibra de carbono)
Límite de esfuerzo bajo carga sostenida y cíclica	$0.20f_{fu}$	$0.30f_{fu}$	$0.55f_{fu}$

Estos valores deben limitarse de acuerdo con:

$$f_{f,s} \leq \text{limite de esfuerzo bajo carga sostenida y cíclica} \quad 3.26$$

Resistencia última de elementos rectangulares

El cálculo de la resistencia última se puede realizar mediante un proceso iterativo que consiste en suponer una profundidad del eje neutro c y a partir de ello calcular la deformación unitaria del PRF y el acero de refuerzo. En la figura 3.2 se muestra el bloque de esfuerzos de un elemento reforzado con PRF a flexión.

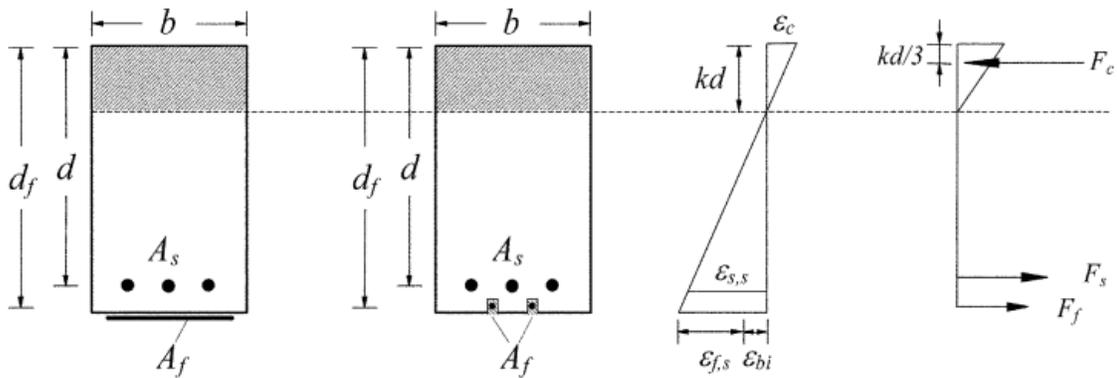


Figura 3.2 Distribución de esfuerzos y deformaciones en un elemento reforzado con PRF (ACI 440.2R-08)

El procedimiento para calcular la resistencia a flexión en elementos rectangulares se presenta a continuación:

1. Proponer un valor de la profundidad del eje neutro c
2. Calcular las deformaciones unitarias del PFR y del acero como:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad \text{para las deformaciones en el PRF} \quad 3.27$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad \text{para las deformaciones en el acero} \quad 3.28$$

donde:

- ε_{fe} : es la deformación unitaria del PRF
- ε_{cu} : es la deformación unitaria máxima del concreto (0.003)
- d_f : es la profundidad efectiva del refuerzo de flexión
- ε_{bi} : es la deformación unitaria del concreto al momento de la instalación del PRF
- ε_{fd} : es la deformación unitaria de desprendimiento del PRF
- ε_s : es la deformación unitaria máxima del acero de refuerzo
- ε_{fe} : es la deformación unitaria máxima del PRF
- d : es la distancia entre la fibra extrema a compresión y centroide del refuerzo a tensión

3. Calcular los esfuerzos en el PRF y el acero como sigue:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad 3.29$$

$$f_{fs} = E_s \varepsilon_{fs} \quad 3.30$$

4. Calcular la profundidad del eje neutro:

$$c = \frac{A_s f_y + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} \quad 3.31$$

donde:

α_1, β_1 : están asociados con el bloque de rectangular de esfuerzos de Whitney

5. Verificar que la profundidad del eje neutro propuesta sea igual al calculado, de lo contrario se deberá realizar una nueva iteración.
6. Cuando los valores de la profundidad del eje neutro obtenidos en el paso 1 y el paso 4 sean iguales se podrá calcular la capacidad nominal a flexión del elemento reforzado con PRF, se calcula como:

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad 3.32$$

donde:

Ψ_f : se tomó igual a 0.85 (ACI 440.2R-08)

7. Calcular los esfuerzos bajo cargas de servicio en el acero y el PRF

Se pueden calcular mediante la sección agrietada utilizando la siguiente ecuación:

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) (d_f - kd)} \quad 3.33$$

donde:

$f_{s,s}$: es el esfuerzo en el refuerzo bajo cargas de servicio

M_s : es el momento ocasionado por cargas de servicio

ε_{bi} : es la deformación unitaria del concreto al momento de la instalación del PRF

A_f : es el área de refuerzo del PRF

E_f : es el módulo de elasticidad del PRF

d_f : es la profundidad efectiva del refuerzo de flexión

kd : es el primer momento de áreas de la sección transformada

d : es la distancia entre la fibra extrema a compresión y centroide del refuerzo a tensión

E_s : es el módulo de elasticidad del acero

A_s : es el área del acero de refuerzo

Para calcular los esfuerzos en el PRF se utiliza la ecuación:

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \frac{d_f - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f \quad 3.34$$

8. Verificar que el acero y el PRF cumplan con los límites de esfuerzos máximos de acuerdo con los valores de la tabla 3.2.

3.2.3. Carga axial

La ductilidad de columnas de concreto se puede mejorar al confinarlas con el sistema de PRF. Además de incrementar la ductilidad, se tiene un aumento en la capacidad de carga. El ACI 440.R2-08 no reconoce la resistencia a compresión del PRF. Sin embargo, permite el aumento en la resistencia mediante el confinamiento.

El incremento en la resistencia a compresión en elementos de concreto se logra confinándolos con una o más capas de PFR. Las fibras deben orientarse transversalmente al eje longitudinal del elemento. EL refuerzo de PFR proporciona un confinamiento pasivo a compresión el cual permanece sin esfuerzo hasta la dilatación del miembro a compresión. La resistencia a compresión de un elemento reforzado con PRF se calcula como (ACI 440.R2-08):

Para elementos reforzados con refuerzo transversal en espiral

$$\phi P_n = 0.85\phi[0.85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + fyA_{st}] \quad 3.35$$

Para elementos reforzados con refuerzo transversal de estribos

$$\phi P_n = 0.8\phi[0.85f'_{cc}(A_g - A_{st}) + fyA_{st}] \quad 3.36$$

donde

- ϕP_n : resistencia a compresión axial del elemento
- f'_{cc} : resistencia a la compresión del concreto confinado
- A_g : es el área bruta de la sección trasversal de concreto
- A_{st} : es el área total del refuerzo longitudinal
- fy : es el esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo

El valor del factor ϕ será igual a 0.70 para columnas con refuerzo en espiral, para columnas con estribos se tomara $\phi = 0.65$

La resistencia máxima a compresión del concreto considerando el confinamiento por el PRF se calcula como (ACI 440.R2-08):

$$f'_{cc} = f'_c = \psi_f 3.3k_a f_l \quad 3.37$$

donde

- f_l : es el máximo esfuerzo de confinamiento proporcionado por el PRF
- ψ_f : es un factor de reducción con valor igual a 0.95 (ACI 440.R2-08)
- k_a : es un factor de eficiencia que depende de la geometría del elemento

Para secciones circulares

$$f_l = \frac{2E_f n t_f \epsilon_{fe}}{D} \quad 3.38$$

donde

- f_l : es el máximo esfuerzo de confinamiento proporcionado por el PRF
- n : es el número de capas de refuerzo con PRF
- t_f : es el espesor del PRF

ε_{fe} : es la deformación unitaria del PRF
 D : es el diámetro de la sección transversal del elemento a compresión

El valor de la deformación efectiva en el PRF ε_{fe} esta dada por (ACI 440.R2-08):

$$\varepsilon_{fe} = k_{\varepsilon} \varepsilon_{fu} \quad 3.39$$

donde:

ε_{fu} : es la deformación unitaria de ruptura proporcionada por el fabricante
 k_{ε} : es un factor de eficiencia con valor de 0.55 (ACI 440.R2-08)

Para elementos de sección rectangular deberá calcularse D como la longitud de la diagonal esto es:

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} \quad 3.40$$

donde:

b : es el ancho de la cara a compresión del elemento
 h : es el largo de la cara a compresión del elemento

Además deberán calcularse los factores de forma k_a y k_b , los cuales dependen del área de la sección transversal de concreto reforzado y la relación de aspecto h/b , se calculan como (ACI 440.R2-08):

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad 3.41$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b}\right)^{0.5} \quad 3.42$$

donde

A_e : es el área efectivamente confinada de la sección transversal de concreto
 A_c : es el área de la sección transversal de concreto

Para secciones circulares los valores k_a y k_b se tomaran igual a 1

El valor del área efectiva de confinamiento A_e se calcula como (ACI 440.R2-08):

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{[(\frac{b}{h})(h - 2r_c)^2 + (\frac{h}{b})(b - 2r_c)^2]}{3A_g} - \rho_g}{1 - \rho_g} \quad 3.43$$

donde

A_g : es el área bruta de la sección de la columna
 A_c : es el área transversal de la columna de concreto en compresión
 ρ_g : es la relación de esfuerzo longitudinal
 r_c : es el radio de curvatura de la esquina redondeada de la columna
 b, h : son las dimensiones de la columna rectangular

La deformación unitaria que el concreto puede alcanzar se calcula con la ecuación (ACI 440.R2-08):

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1.50 + 12k_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right) \quad 3.44$$

donde

- ε_{ccu} : es el área bruta de la sección de la columna
- ε'_c : es la deformación unitaria máxima del concreto no confinado
- k_b : es el factor de eficiencia del refuerzo con PRF
- f_l : es el esfuerzo máximo de confinamiento
- f'_c : es la resistencia del concreto
- ε_{fe} : es la deformación unitaria del PRF

El valor obtenido con la ecuación 3.44 deberá limitarse a:

$$\varepsilon_{ccu} \leq 0.01 \quad 3.45$$

Este límite es utilizado para prevenir el agrietamiento excesivo, cuando el límite sea superado el valor de f'_c deberá calcularse con curvas de esfuerzo deformación (ACI 440.R2-08).

Consideraciones de servicio

Deberá evitarse que el miembro presente cargas de servicio muy cercanas a la de su resistencia nominal, ya que el elemento puede presentar agrietamiento excesivo. Para evitar esto se recomienda que el esfuerzo a compresión del concreto no exceda el 0.65 f'_c para cargas de servicio. De la misma forma se limitara el esfuerzo del acero longitudinal a compresión revisando que no exceda de 0.60 f_y para cargas de servicio.

3.2.4. Flexo-compresión

El confinamiento con PRF se puede utilizar para incrementar la resistencia de miembros sujetos a flexo-compresión. La mejora de la resistencia en elementos se puede realizar con la ecuación (3.44) la cual permite incrementar la deformación unitaria del concreto debido al confinamiento. Al confinar la sección e incrementar su deformación unitaria se obtiene un incremento en la capacidad de carga a flexo-compresión.

El procedimiento que aquí se presenta está basado en el presentado por el ACI 440.2R y en los supuestos establecidos por (Bank 2006).

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Al reforzar un elemento a flexo-compresión el ACI 440.2R no admite el aumento de la capacidad de carga axial mediante el confinamiento. Sin embargo, señala que es necesario construir el diagrama de interacción tomando en cuenta el confinamiento del PRF. Entonces la aportación del PRF se traduce en un incremento en la deformación del concreto debido al confinamiento. Para construir el diagrama de interacción se pueden considerar dos supuestos (Bank 2006).

Supuesto 1. El confinamiento del PRF se aplica a la resistencia a la compresión del concreto. Esto significa que el diagrama de interacción puede construirse intercambiando el valor de f'_c por f'_c (máximo esfuerzo de confinamiento). Esta suposición implica que toda la zona de compresión esta confinada por la envoltura de PRF.

Supuesto 2. La deformación unitaria máxima del concreto deberá tomarse como ϵ_{cc} en lugar de ϵ_c . Donde ϵ_{cc} corresponde a la deformación unitaria debida a f'_{cc} de la columna confinada con PRF.

Para calcular la capacidad de un elemento a flexo-compresión se propone el siguiente procedimiento:

Paso 1. Calcular las propiedades de diseño de la fibra a utilizar (ACI 440.2R-08) ecuaciones (3.2) y (3.3).

Paso 2. Determinar el máximo esfuerzo de confinamiento del elemento y la deformación unitaria debida al confinamiento ecuaciones (3.37) y (3.44), la deformación efectiva en el PRF debe ser limitada de acuerdo con la ecuación (3.45).

Paso 3. Determinar puntos que delimiten el diagrama de interacción mediante el bloque de esfuerzos (González y Robles, 2005). El diagrama se puede construir sustituyendo la deformación unitaria del concreto ϵ_{cu} por la deformación unitaria máxima ϵ_{cc} debida al confinamiento. El ACI 440.2R-08 únicamente permite la aplicación del supuesto 2 para el diseño e elementos sujetos a flexo-compresión. El procedimiento se ejemplifica en capítulo 4.

CAPÍTULO 4

REFUERZO DE COLUMNAS CON PRF

Se presenta el cálculo de la capacidad a flexo-compresión de columnas que manifiestan agrietamiento vertical (agrietamiento comúnmente asociada a la falta de capacidad a compresión de los elementos estructurales), para ello se propone una manera de evaluar su capacidad. Además, se incluye el cálculo considerando un refuerzo a flexo-compresión y cortante, en columnas y capiteles respectivamente. El sistema considerado par el refuerzo de los elementos estructurales fue el de Polímeros Reforzados con Fibras de Carbono (PRFC).

4.1. REFUERZO A CORTANTE EN CAPITELES

El refuerzo transversal proporcionado en los capiteles es de dos estribos uno interior y el otro exterior ambos del # 4, con una separación de 40 cm. Es decir el refuerzo proporcionado considerando 100 cm es:

$$4 \times 1.27 \times 6 = 30.48 \text{ cm}^2$$

El refuerzo transversal mínimo requerido (NTCC-2004) es:

$$A_s \text{ min} = (0.0025 \times 250 \times 100) = 62.5 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto, es necesario proporcionar refuerzo adicional. El sistema utilizado será el de PRF con fibras de carbono.

Para determinar el refuerzo primero se debe obtener el VsR correspondiente a la cantidad de refuerzo faltante en el elemento.

VsR se despeja de la ecuación 2.23 de la sección 2.5.2.3 de las NTCC-2004. Considerando que la separación de los estribos es a cada 100 cm y $A_v = 62.5 - 30.48 = 32.02 \text{ cm}^2$

$$V_{sR} = \frac{0.8 \times 32.02 \text{ cm}^2 \times 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 250 \text{ cm}}{100 \text{ cm}} = 268.97 \text{ t}$$

Para el fortalecimiento de los capiteles a cortante se utilizó el encamisado de fibras de carbono. Se propone utilizar fibra de carbono SikaWrap 530 C de 50 cm de ancho, las propiedades de diseño son:

$$E_f = 49.1 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}; f_{fu}^* = 713 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}; \varepsilon_{fu}^* = 0.014; t_f = 1.3 \text{ mm}$$

Paso 1. Calcular las propiedades de diseño del sistema de PRF para ello se utilizan las ecuaciones (3.2) y (3.3). Como la columna se encuentra expuesta a la intemperie se considera un factor de reducción ambiental de CE = 0.85.

Si CE = 0.85 tenemos:

$$\varepsilon_{fu} = 0.0119$$

$$f_{fu} = 606.05 \frac{N}{mm^2}$$

Paso 2. Calcular el nivel de tensiones efectivas en el refuerzo FRP, esto se hace para garantizar que la fibra de carbono trabaje, se utiliza la ecuación (3.10).

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \varepsilon_{fu}$$

$$0.75 \varepsilon_{fu} = 0.009$$

$$0.004 \leq 0.009 \quad \text{CUMPLE}$$

Paso 3. Determinar el área requerida de fibra de carbono. Se consideran los factores recomendados por el ACI 440.2R-08, $\phi = 0.85$ y $\Psi_f = 0.95$ para columnas completamente envueltas por fibra de carbono.

La fuerza cortante que debe resistir la fibra deberá ser incrementada por los factores antes mencionados. El área necesaria del refuerzo se calculó a partir de la fuerza cortante V_{freqd} esto es:

$$V_{freqd} = \frac{268.97}{0.85 * 0.95} = 3267.586 \text{ kN}$$

El área requerida de refuerzo será calculó con la ecuación (3.7):

$$A_{fvreqd} = \frac{3267.586 \text{ kN} * S_f}{0.004 * 53.1 \frac{kN}{mm^2} (1) * 2500 \text{ mm}} = 6.65 S_f$$

Paso 4. Determinar el número de capas y espaciamiento de la fibra, se utilizó la ecuación (3.8).

$$n = \frac{6.65 S_f}{2 * 1.3 \text{ mm} * w_f} = 2.56 \frac{S_f}{w_f}$$

Si la fibra es colocada de manera continua a lo largo de la columna se tiene $S_f = w_f$. Entonces, es necesario utilizar 3 capas de fibra de carbono envolviendo el capitel en toda altura.

Adicionalmente es necesario determinar la longitud de desarrollo para que la fibra trabaje, esto se obtiene con la ecuación:

$$L_{df} = \sqrt{\frac{n * E_f * t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad 4.1$$

$$L_{df} = \sqrt{\frac{3 * 49100 \frac{N}{mm^2} * 1.3 mm}{\sqrt{24.52 \frac{N}{mm^2}}}} = 196.66 mm$$

Por lo tanto, para cubrir la falta de refuerzo transversal en los capiteles. Se propone encamisarlas con fibra de carbono SikaWrap 530 C aplicando un total de 3 pliegues. Al colocarse el PRFC deberá garantizarse una longitud de desarrollo de 20 cm. El refuerzo se proporcionara en todas la columnas que se muestran en la tabla 4.1. Se colocara envolviendo los capiteles de manera continua en toda su altura.

4.2. REFUERZO A FLEXO-COMPRESIÓN EN COLUMNAS

Un conjunto de siete columnas pertenecientes a un puente vehicular presentan daño en forma de agrietamiento vertical, esto indica que su capacidad de carga se está viendo afectada. Por ello se plantea reforzar las columnas con una capa de PRFC. Para esto se evalúa la capacidad de carga antes y después del agrietamiento. La revisión de la capacidad de carga de las columnas se hizo mediante la construcción de diagramas de interacción.

El objetivo fue reforzar las columnas agrietadas para alcanzar la resistencia que se tenía antes del agrietamiento, es decir, su capacidad de diseño. En la tabla 4.1 se muestra las características de las columnas a reforzar.

Tabla 4.1. Características de las columnas

Columna	Diámetro (cm)	Acero longitudinal	Recubrimiento (cm)	f'c (kg/cm ²)
81 Sur	180	25 paquetes de dos barras #8	9	250
81 Norte	180	25 paquetes de dos barras #8	9	250
83 Sur	180	25 paquetes de dos barras #8	9	250
83 Norte	180	25 paquetes de dos barras #8	9	250
M1	180	28 paquetes de dos barras #8	9	250
M1.1	180	28 paquetes de dos barras #8	9	250
CV 14	180	28 paquetes de dos barras #10	9	250

4.2.1. Cálculo de la capacidad de carga de las columnas

Como primer paso del refuerzo con PRFC se revisó la capacidad de la columna sin agrietar. Por practicidad los diagramas de capacidad de las columnas sin daño se calcularon con el programa SAP2000 (CSI, 2015). Los diagramas de interacción se presentan en la sección 4.2.3 de este trabajo.

4.2.2. Cálculo de la capacidad de columnas agrietadas

Para evaluar la capacidad de carga de las columnas agrietadas se planteó, que una porción del área se encuentra trabajando a compresión. La porción de área se determinó suponiendo una disminución del diámetro en función de la mayor profundidad de grieta. Las profundidades de grieta de las columnas a reforzar con PRFC se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Profundidades de grietas en las columnas

Columna	Profundidad de grieta (cm)
81 Sur	36.9
81 Norte	26.3
83 Sur	33.6
83 Norte	17.5
M1	20.2
M1.1	14.4
CV 14	27.9

Para determinar la capacidad de las columnas agrietadas se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La sección transversal de la columna se vio reducida en función de la mayor profundidad de grieta, esto se puede observar en la figura 4.1.
- La capacidad se determinó mediante el cálculo de diagramas de interacción (Momento-Carga axial) obtenidos variando arbitrariamente la profundidad “c” del eje neutro.
- Se tomaron en cuenta los supuestos establecidos por en la sección 3.2.4 de este trabajo.

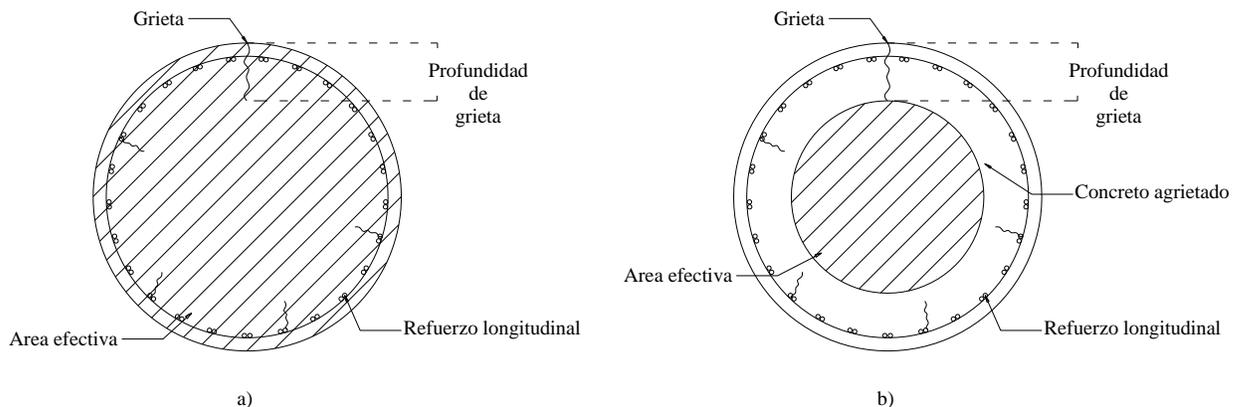


Figura 4.1. Reducción del área transversal en función de la profundidad de grieta.

- a) Columna agrietada sin área transversal reducida
- b) Columna agrietada con área transversal reducida

Determinación del diagrama de interacción de una columna agrietada

Se presenta el procedimiento que se utilizó para determinar la capacidad de la columna 81 Sur. En la Tabla 4.3 se muestran los datos de la columna seleccionada. Para la determinación del diagrama de interacción se propusieron profundidades “c” del eje neutro. Las profundidades se utilizaron para calcular puntos que delimiten la curva de capacidad de la columna. En el cálculo no se incluyeron factores de reducción a momento ni a carga axial. Las consideraciones que se tomaron fueron las siguientes:

- La distribución de deformaciones unitarias longitudinales en la sección transversal del elemento es plana
- Existe adherencia perfecta entre el concreto y el acero
- Se desprecian los esfuerzos de tensión en el concreto
- La deformación unitaria máxima del concreto en compresión es $\epsilon_c=0.003$, dicho valor puede variar al aplicar confinamiento con fibras de carbono
- La distribución de esfuerzos de compresión en el concreto es uniforme

Tabla 4.3. Datos de la columna

Columna	81 Sur
Diámetro	180 cm
Recubrimiento	9 cm
Refuerzo longitudinal	25 paquetes de dos barras #8
f'_c	250 kg/cm ²
Grieta de mayor profundidad	36.9 cm

Procedimiento

Punto. Compresión pura, se calcula con la siguiente ecuación (González y Robles, 2005):

$$P_{oc} = f''c * A_g + A_s * f_y \quad 4.2$$

donde

$f''c$: Es la magnitud del bloque equivalente es igual a $0.85*0.8*f'_c$
 A_g : Área geométrica de la sección
 A_s : Área total de acero de refuerzo

$$P_{oc} = 170 * 8858.07 + 253.5 * 4200 = 2570.57 \text{ t}$$

Punto 1:

$$P = 2570.57 \text{ t}$$

$$M = 0$$

Punto. Donde la profundidad del eje neutro se supone $c = 27.41$ cm

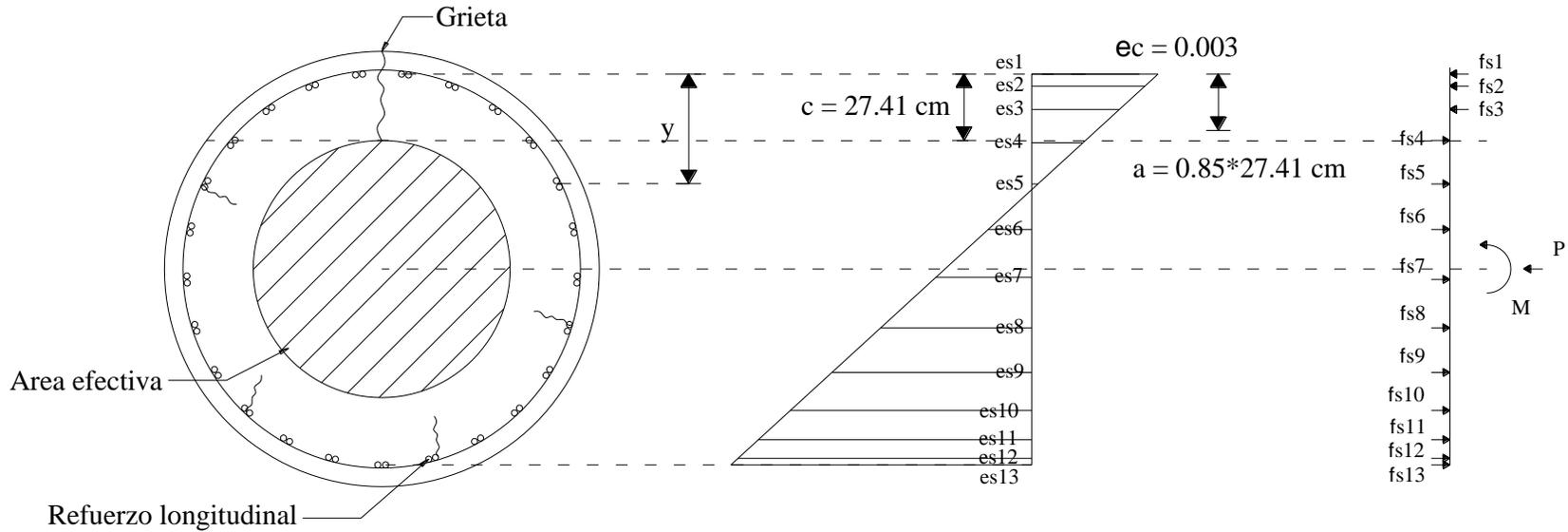


Figura 4.2. Bloque equivalente de esfuerzos $c= 27.41$ cm

Para el cálculo de las deformaciones unitarias “esn” se utilizaron las siguientes expresiones:

Si la profundidad del acero “y” es menor a la profundidad del eje neutro

$$es_n = \frac{e_c}{c} * (c - y) \quad 4.3$$

Si la profundidad del acero “y” es mayor a la del eje neutro

$$es_n = \frac{e_c}{c} * (y - c) \quad 4.4$$

Si la profundidad del acero “y” es mayor a la del eje neutro

$$e_{s_n} = \frac{e_c}{c} * (y - c) \quad 4.5$$

Esfuerzos en el acero

Si “ e_{s_n} ” es mayor o igual “ f_{s_n} ” deberá tomar el valor de f_y . La ecuación para calcular los esfuerzos en el acero es:

$$f_{s_n} = e_{s_n} * f_y \quad 4.6$$

donde:

f_{s_n} : Esfuerzo en el acero
 e_{s_n} : Deformación unitaria del acero
 f_y : Esfuerzo de fluencia del acero

Fuerzas en el acero:

Para calcular la fuerza de cada punto del acero de refuerzo se utiliza la ecuación A.5:

$$F_n = A_{s_n} * f_{s_n} \quad 4.7$$

donde:

F_n : Fuerza en el acero
 A_{s_n} : Área de acero
 f_{s_n} : Esfuerzo en el acero

En la tabla 4.4 se presentan las deformaciones unitarias, esfuerzos y fuerzas correspondientes a cada punto en el que se concentra acero de refuerzo.

Tabla 4.4. Cálculo de fuerzas en el acero

Fuerzas en el acero	Deformación unitaria	Esfuerzo en el acero (kg/cm ²)	Fuerzas en el acero (kg)
$F1 =$	0.0030	4200	85176
$F2 =$	0.0025	4200	85176
$F3 =$	0.0014	2801	56798.80
$F4 =$	0.0001	212	4307.65
$F5 =$	0.0020	3944	79980.18
$F6 =$	0.0040	4200	85176
$F7 =$	0.0063	4200	85176
$F8 =$	0.0085	4200	85176
$F9 =$	0.0105	4200	85176
$F10 =$	0.0122	4200	85176
$F11 =$	0.0136	4200	85176
$F12 =$	0.0144	4200	85176
$F13 =$	0.0147	4200	42588

Fuerza en el concreto

Para calcular la fuerza en el concreto se utiliza la ecuación 4.6. Se consideró un segmento de área a una profundidad “a”, como se define en la ecuación 4.8.

$$C_c = f''_c * A_c = 0 \quad 4.8$$

donde:

C_c : Fuerza en el concreto

A_c : Área de concreto

Cálculo de la fuerza axial “P”

La sumatoria fuerzas del el acero y el concreto da como resultado el valor de “P. El cálculo sería:

$$P = C_c + F_1 + F_2 + F_3 - F_4 - F_5 - F_6 - F_7 - F_8 - F_9 - F_{10} - F_{11} - F_{12} - F_{13}$$

$$P = -495.96 \text{ t}$$

Cálculo del momento flexionante “M”

En la Tabla 4.5 se presenta el cálculo del momento flexionante. Se suman momentos con respecto al centroide de la columna.

Tabla 4.5. Cálculo del momento flexionante “M”

Fuerza (ton)	Brazo (cm)	Momento (ton-cm)
0.00	80.6	0.00
85.18	80.6	6865.19
85.18	75.61	6440.16
56.80	65.99	3748.15
4.31	52.23	224.99
79.98	35.19	2814.50
85.18	16.37	1394.33
85.18	4.31	367.11
85.18	24.29	2068.93
85.18	42.74	3640.42
85.18	58.5	4982.80
85.18	70.59	6012.57
85.18	78.24	6664.17
42.59	80.98	3448.78
	Total	48672.09

Las coordenadas del punto $c = 27.41$ son:

$$P = -495.96 \text{ t} \quad M = 486.72 \text{ t} - m$$

Punto. Tensión

Para calcular éste punto se utilizó la ecuación (González y Robles 2005):

$$P_{tensión} = A_s * F_y \quad 4.9$$

donde:

$P_{tensión}$: Es la fuerza a tensión de la columna
 A_s : Área total de acero de refuerzo
 F_y : Esfuerzo de fluencia en el acero

$$P_{tensión} = 253.5 * 4200 = 1064.7 t$$

El punto de tensión:

$$P = -1064.7 t \quad M = 0$$

A manera de resumen las coordenadas de los puntos que delimitan el diagrama de interacción de la columna 81 Sur se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Puntos que definen el diagrama de interacción de la columna 81 Sur

Punto	Momento (t-m)	Carga axial (t)
Compresión	0	2570.57
c = 27.41 cm	486.72	-495.96
c = 53.8 cm	574.71	-56.15
c = 80 cm	659.2	531.05
c = 133.8 cm	409.1	1821.1
c = 147.8	339.74	2052.57
tensión	0	-1064.7

4.2.3. Cálculo de la capacidad de columnas reforzadas con PRFC

Aportación del sistema de refuerzo con PRF a la capacidad de las columnas

La norma ACI 440.2R-08 considera que para determinar la capacidad de elementos sujetos a flexo-compresión es necesario construir el diagrama de interacción. Al construir el diagrama de interacción de un elemento reforzado con PRF es necesario incluir el efecto de confinamiento que este provee. La deformación unitaria máxima del concreto deberá tomarse como ϵ_{cc} en lugar de ϵ_c . ϵ_{cc} corresponde a la deformación unitaria debida el máximo esfuerzo de la columna confinada con PRFC.

Al confinar el elemento se consideró nula la disminución de capacidad de carga debido al agrietamiento. Los pasos para construir el diagrama de la columna reforzada con fibra de carbono se presentan a continuación:

Paso 1. Calcular las propiedades de la fibra a utilizar (ACI 440.2R-08).

La fibra utilizada fue el producto SikaWrap -530 C. Las propiedades mecánicas se obtuvieron de las fichas técnicas publicadas por el fabricante y se presentan en la tabla 4.7. Para el cálculo de las propiedades de diseño se aplican factores que tienen en cuenta la exposición ambiental del elemento (ACI 440.2R-08).

Tabla 4.7. Propiedades del PRFC

Módulo de Elasticidad de la fibra (E_f)	49,100 MPa
Deformación unitaria de diseño (ϵ_{fu}^*)	1.4 %
Resistencia a la tensión (f_{fu}^*)	713 MPa
Espesor (t_f)	1.2 mm

$$E_f = 500509.684 \frac{kg}{cm^2}$$

Para el cálculo de la deformación unitaria de diseño se utiliza la ecuación 3.3.

$$C_e = 0.55$$

$$\epsilon_{fe} = C_e * \epsilon_{fu} = 0.0077$$

El valor “Ce” es el recomendado por la norma ACI 440.2R-08. Se propone reforzar la columna con una capa de fibra de carbono para lograr el confinamiento.

$$n = 1 \text{ capa de fibra de carbono}$$

Paso 2. Determinar la deformación unitaria de la columna confinada con una capa de PRFC.

Esfuerzo debido al confinamiento

Para columnas de sección circular se utiliza la ecuación 3.38

$$f_l = 5.567 \frac{kg}{cm^2}$$

Máximo esfuerzo de confinamiento

El máximo esfuerzo de confinamiento del concreto se calcula con la ecuación 3.37. ka es un factor de eficiencia que depende de la geometría de la sección y ψ_f es igual a 0.95 (ACI 440.2R-08). Debido a que se trata de una columna de sección circular el valor ka es igual a 1.0 (ACI 440.2R-08).

$$f'_{cc} = 266.11 \frac{kg}{cm^2}$$

Adicionalmente se debe revisar que la deformación unitaria obtenida con la ecuación (3.44) del concreto no exceda el valor de 0.01

$$\epsilon_{cc} = 0.006399 < 0.01 \quad \text{Cumple}$$

En la figura 4.5 se puede observar que la fibra de carbono se encuentra colocada perimetralmente confinando la columna en toda la altura. De esta manera la fibra induce un confinamiento pasivo que se traduce en un incremento en la capacidad de carga de la columna. Al lograr el confinamiento de la columna con una capa de fibra de carbono se consideró el área total de la columna como área efectiva, tal como se muestra en la figura 4.5.

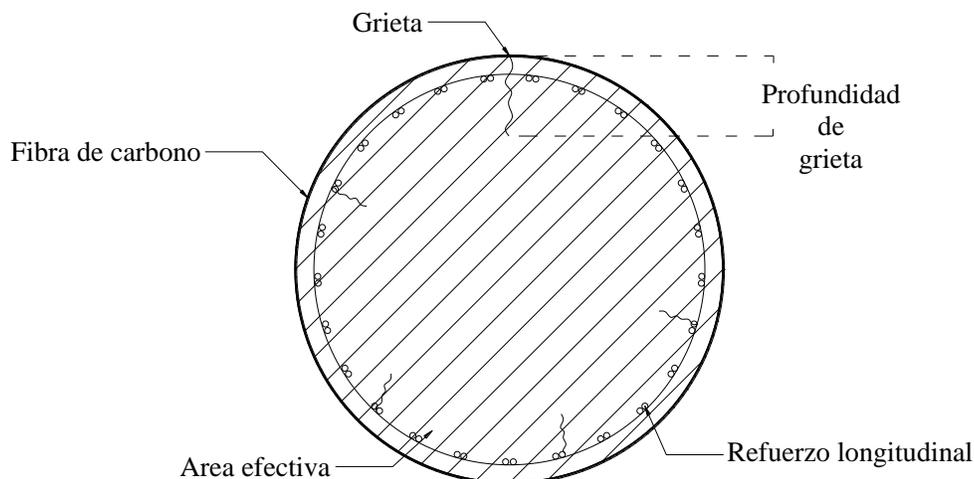


Figura 4.5. Columna confinada con fibra de carbono

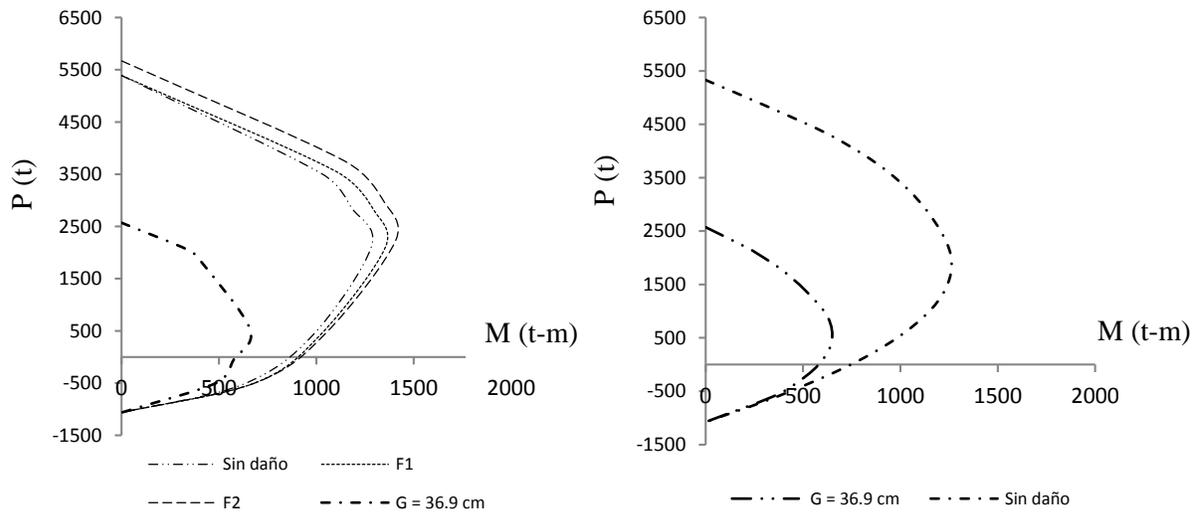
Para calcular el diagrama de interacción de la columna 81 Sur reforzada con PRFC se llevó a cabo el mismo procedimiento que se utilizó para la columna agrietada. En la tabla 4.8 se presentan los datos de los casos que se analizaron.

Tabla 4.8. Condiciones de análisis para la columna 81 Sur

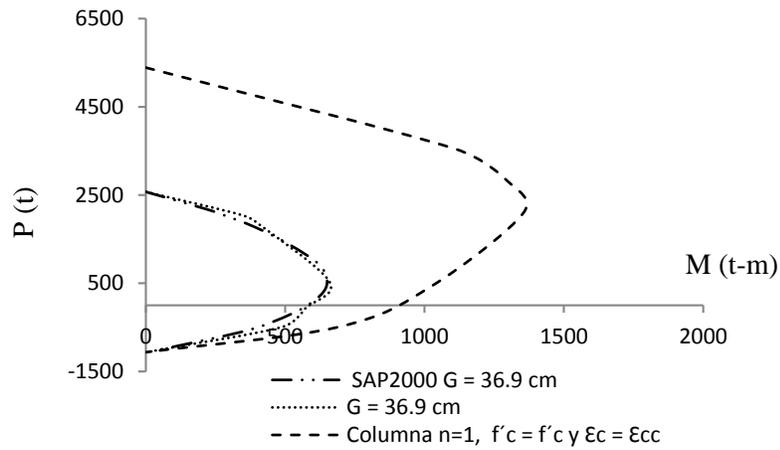
	Sin daño	Agrietada	Caso 1 (F1)	Caso 2 (F2)
Díámetro	180 cm	Grieta = 36.9 cm	180 cm	180 cm
Recubrimiento	9 cm	9 cm	9 cm	9 cm
Refuerzo longitudinal	25 paquetes de dos barras #8			
f'_c	250 kg/cm ²	$f'_c = f'_{cc}$	250 kg/cm ²	266.1 kg/cm ²
$\epsilon_c = \epsilon_{cc}$	0.006399	$\epsilon_c = \epsilon_{cc}$	0.006399	0.006399

Para cada una de las columnas presentadas en la tabla 4.8 se realizó el mismo procedimiento. En todas las columnas se evaluaron cuatro condiciones, columna sin daño, agrietada y reforzada con PRFC condiciones F1 y F2. La condición “F1” considera que el refuerzo con PRFC incrementa la deformación unitaria del concreto. La condición “F2” contempla el incremento en la deformación unitaria del concreto y el aumento en el esfuerzo a compresión del concreto debido al confinamiento del PRFC.

En la figura 4.6 se presentan los diagramas de interacción de la columna 81 Sur. En la figura 4.6 se puede observar que la columna reforzada con PRFC tiene una capacidad de carga mayor a la no reforzada. Es decir, se ha recuperado la capacidad de diseño de la columna agrietada.



a) Diagramas de interacción obtenidos b) Diagramas de interacción obtenidos con el programa SAP2000



c) Comparación de capacidad de la columna

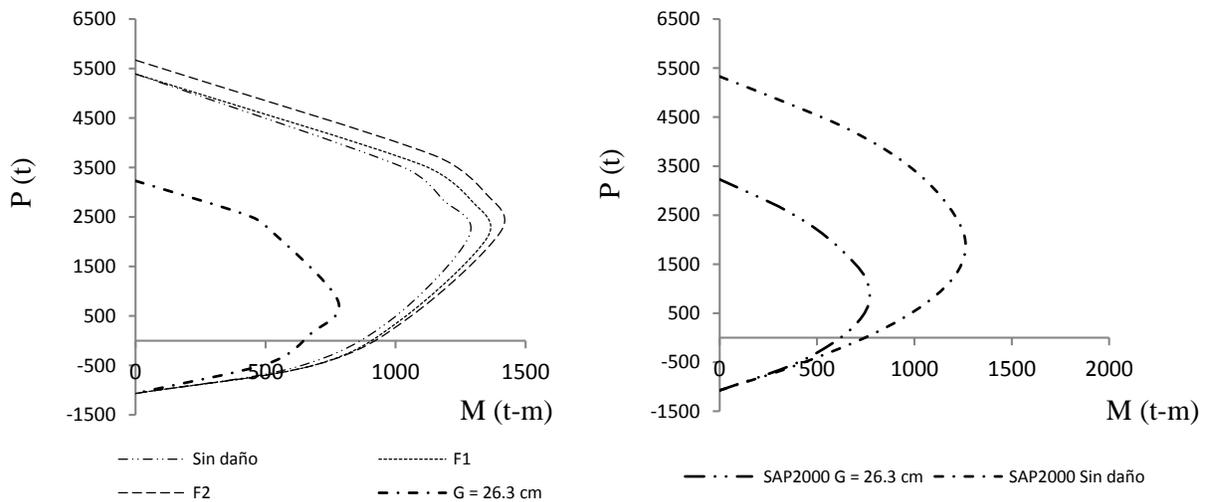
Figura 4.6. Diagramas de interacción columna 81 Sur

En la figura 4.6 “a” se puede observar que la capacidad de la columna reforzada con PRFC es ligeramente superior a la no reforzada, además la capacidad de la columna con daño es significativamente menor a la de la columna reforzada. También se puede observar que la condición F2 incrementa aún más la capacidad de la columna reforzada, sin embargo la condición F2 no es permitida (ACI 440.2R). El incremento de capacidad entre la columna agrietada y la reforzada con PRFC es de un 100 %.

En la figura 4.7 se muestran los diagramas de interacción correspondientes a las condiciones de análisis de la columna 81 Norte. Dichas condiciones se presentan en la tabla 4.9. En la figura 4.7 se puede observar que la columna reforzada con PRFC tiene una capacidad de carga mayor a la no reforzada. Es decir, se ha recuperado la capacidad de diseño de la columna agrietada.

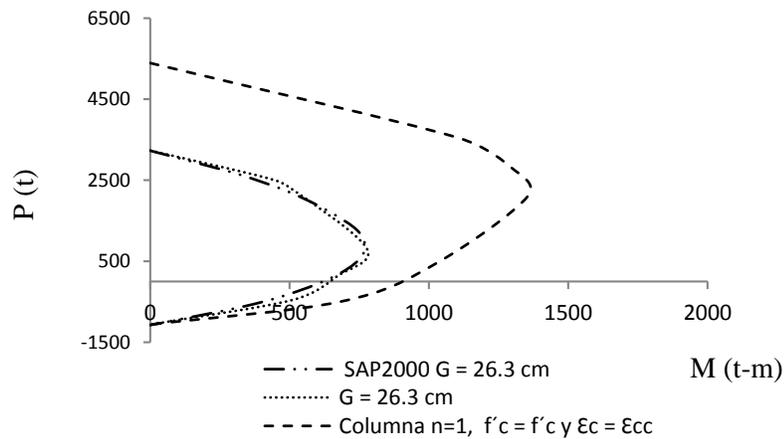
Tabla 4.9. Condiciones de análisis para la columna 81 Norte

	Sin daño	Agrietada	Caso 1 (F1)	Caso 2 (F2)
Diámetro	180 cm	Grieta = 26.3 cm	180 cm	180 cm
Recubrimiento	9 cm	9 cm	9 cm	9 cm
Refuerzo longitudinal	25 paquetes de dos barras #8			
$f'c$	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	266.11 kg/cm ²
$\epsilon_c = \epsilon_{cc}$	0.003	0.003	0.006399	0.006399



a) Diagramas de interacción obtenidos

b) Diagramas de interacción obtenidos con el programa SAP2000



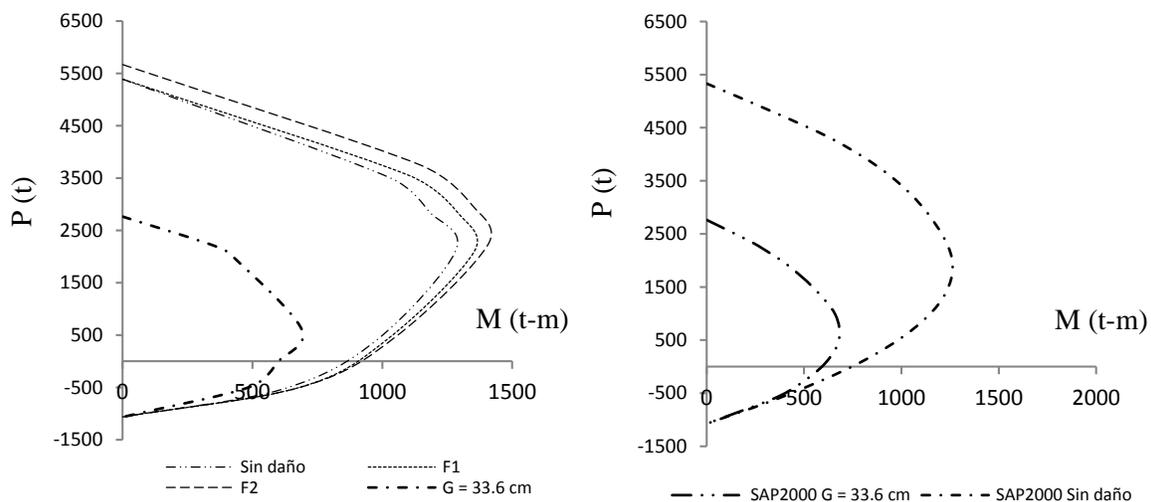
c) Comparación de capacidad de la columna

Figura 4.7. Diagramas de interacción columna 81 Norte

En la figura 4.8 se muestran los diagramas de interacción correspondientes a las condiciones de análisis de la columna 83 Sur. Dichas condiciones se presentan en la tabla 4.10. En la figura 4.8 se puede observar que la columna reforzada con PRFC tiene una capacidad de carga mayor a la no reforzada. Es decir, se ha recuperado la capacidad de diseño de la columna agrietada.

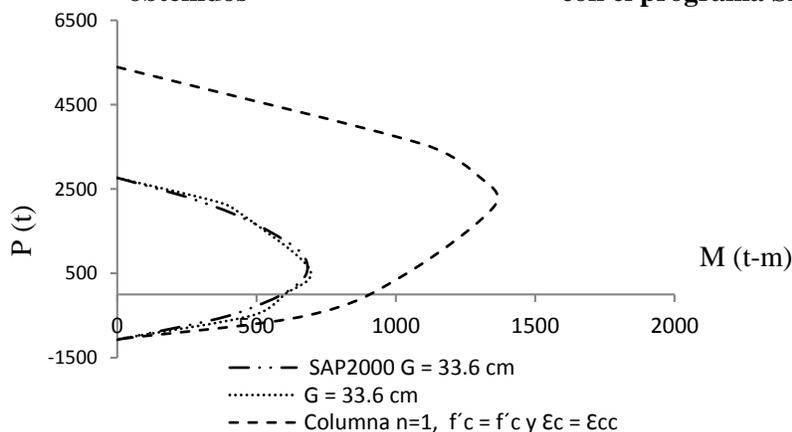
Tabla 4.10. Condiciones de análisis para la columna 83 Sur

	Sin daño	Agrietada	Caso 1 (F1)	Caso 2 (F2)
Diámetro	180 cm	Grieta = 33.6 cm	180 cm	180 cm
Recubrimiento	9 cm	9 cm	9 cm	9 cm
Refuerzo longitudinal	25 paquetes de dos barras #8			
$f'c$	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	266.11 kg/cm ²
$\epsilon_c = \epsilon_{cc}$	0.003	0.003	0.006399	0.006399



a) Diagramas de interacción obtenidos

b) Diagramas de interacción obtenidos con el programa SAP2000



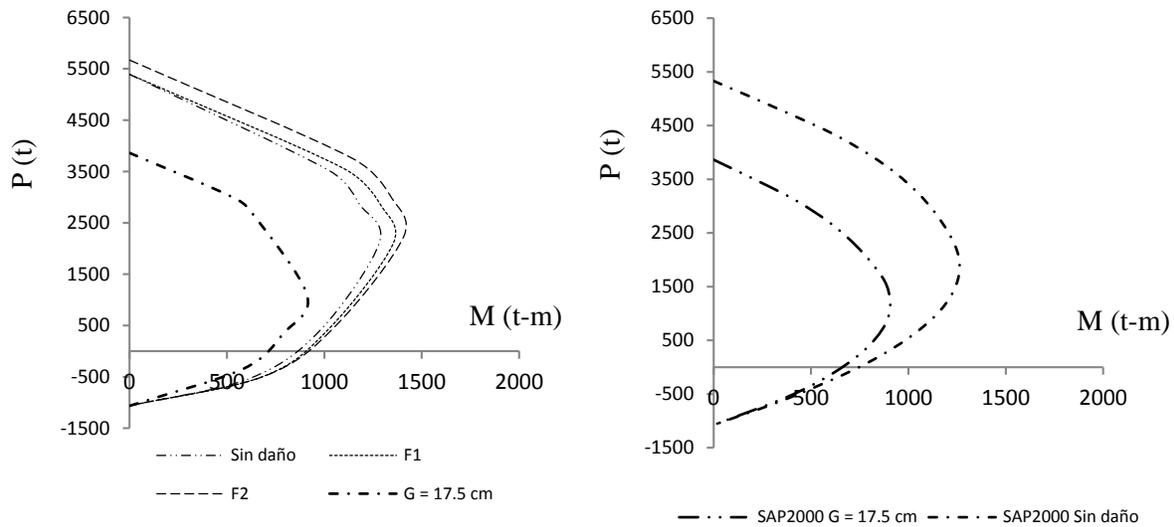
c) Comparación de capacidad de la columna

Figura 4.8. Diagramas de interacción columna 83 Sur

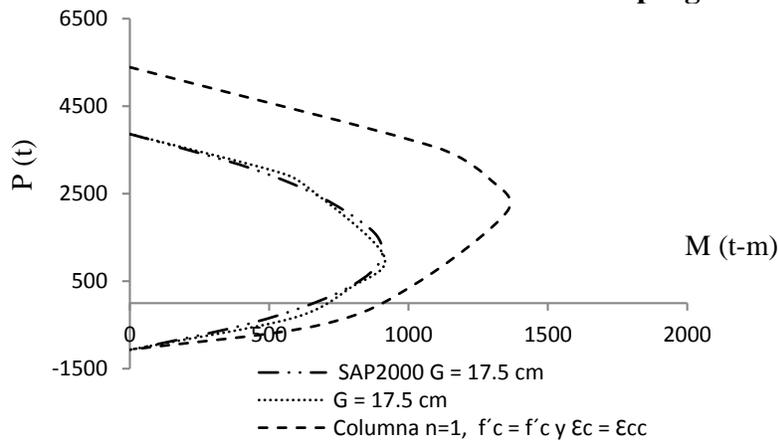
En la figura 4.9 se muestran los diagramas de interacción correspondientes a las condiciones de análisis de la columna 83 Norte. Dichas condiciones se presentan en la tabla 4.11. En las figura 4.9 se puede observar que la columna reforzada con PRFC tiene una capacidad de carga mayor a la no reforzada. Es decir, se ha recuperado la capacidad de diseño de la columna agrietada.

Tabla 4.11. Condiciones de análisis para la columna 83 Norte

	Sin daño	Agrietada	Caso 1 (F1)	Caso 2 (F2)
Diámetro	180 cm	Grieta = 33.6 cm	180 cm	180 cm
Recubrimiento	9 cm	9 cm	9 cm	9 cm
Refuerzo longitudinal	25 paquetes de dos barras #8			
$f'c$	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	266.11 kg/cm ²
$\epsilon_c = \epsilon_{cc}$	0.003	0.003	0.006399	0.006399



d) Diagramas de interacción obtenidos e) Diagramas de interacción obtenidos con el programa SAP2000



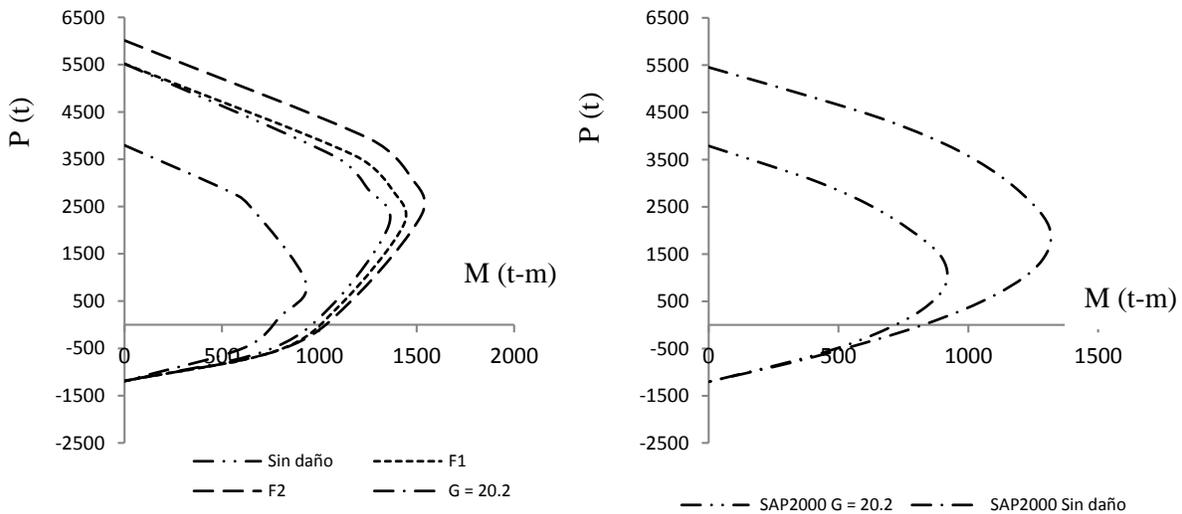
f) Comparación de capacidad de la columna

Figura 4.9. Diagramas de interacción columna 83 Norte

En la figura 4.10 se muestran los diagramas de interacción correspondientes a las condiciones de análisis de la columna M1. Dichas condiciones se presentan en la tabla 4.12. En las figura 4.10 se puede observar que la columna reforzada con PRFC tiene una capacidad de carga mayor a la no reforzada. Es decir, se ha recuperado la capacidad de diseño de la columna agrietada.

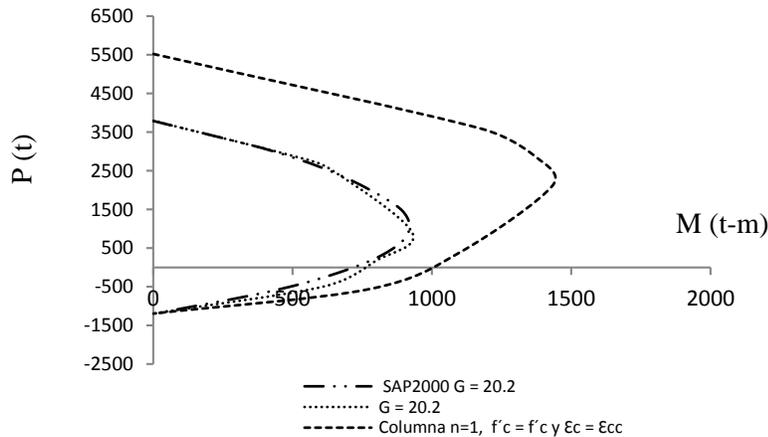
Tabla 4.12. Condiciones de análisis para la columna M1

	Sin daño	Agrietada	Caso 1 (F1)	Caso 2 (F2)
Diámetro	180 cm	Grieta = 20.2 cm	180 cm	180 cm
Recubrimiento	9 cm	9 cm	9 cm	9 cm
Refuerzo longitudinal	28 paquetes de dos barras #8			
$f'c$	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	266.11 kg/cm ²
$\epsilon_c = \epsilon_{cc}$	0.003	0.003	0.006399	0.006399



a) Diagramas de interacción obtenidos

b) Diagramas de interacción obtenidos con el programa SAP2000



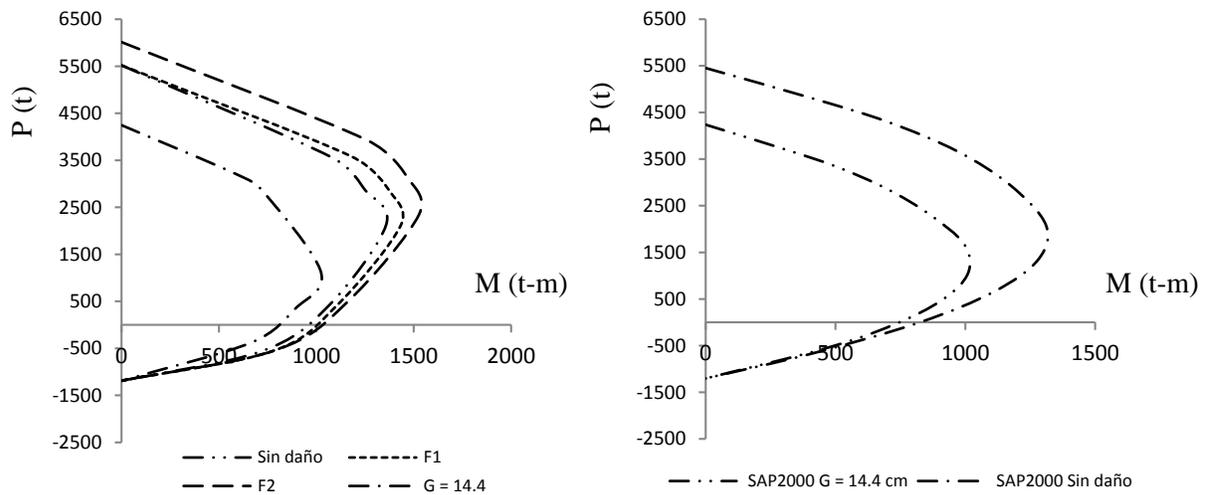
c) Comparación de capacidad de la columna

Figura 4.10. Diagramas de interacción columna M1

En la figura 4.11 se muestran los diagramas de interacción correspondientes a las condiciones de análisis de la columna M1.1. Dichas condiciones se presentan en la tabla 4.13. En las figura 4.11 se puede observar que la columna reforzada con PRFC tiene una capacidad de carga mayor a la no reforzada. Es decir, se ha recuperado la capacidad de diseño de la columna agrietada.

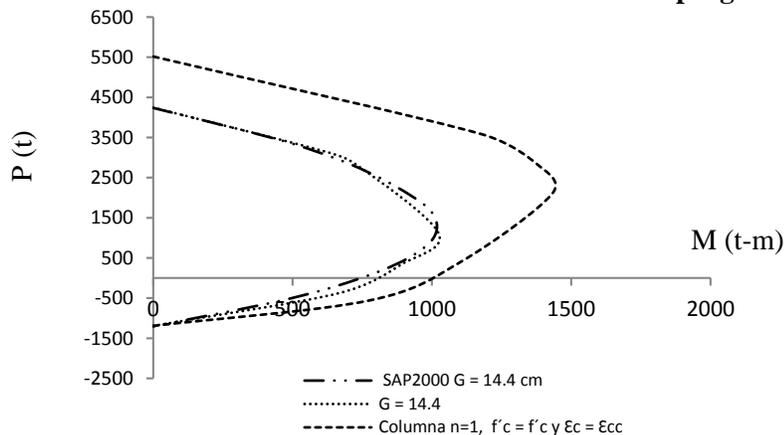
Tabla 4.13. Condiciones de análisis para la columna M1.1

	Sin daño	Agrietada	Caso 1 (F1)	Caso 2 (F2)
Diámetro	180 cm	Grieta = 14.4 cm	180 cm	180 cm
Recubrimiento	9 cm	9 cm	9 cm	9 cm
Refuerzo longitudinal	28 paquetes de dos barras #8			
$f'c$	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	266.11 kg/cm ²
$\epsilon_c = \epsilon_{cc}$	0.003	0.003	0.006399	0.006399



a) Diagramas de interacción obtenidos

b) Diagramas de interacción obtenidos con el programa SAP2000



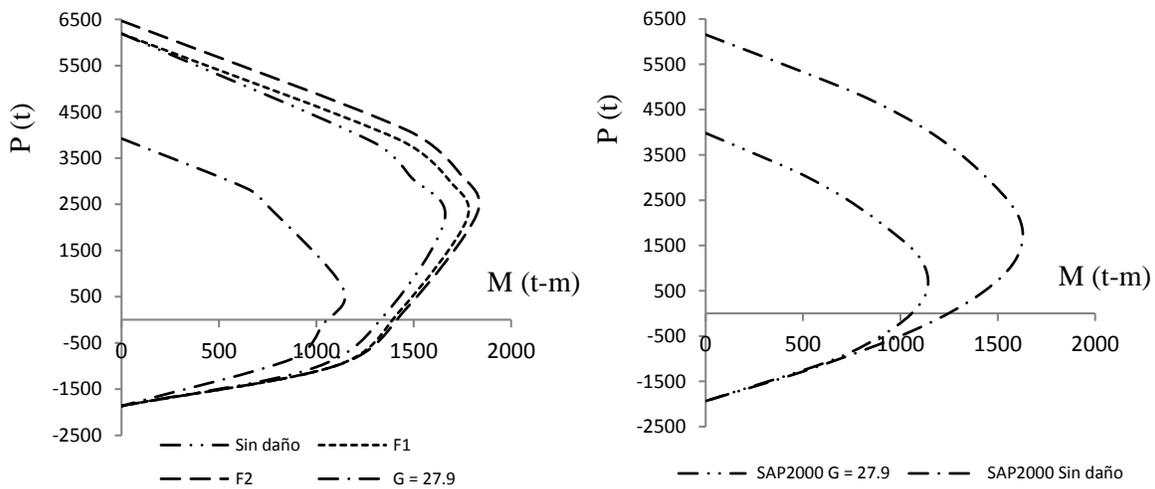
c) Comparación de capacidad de la columna

Figura 4.11. Diagramas de interacción columna M1.1

En la figura 4.12 se muestran los diagramas de interacción correspondientes a las condiciones de análisis de la columna CV 14. Dichas condiciones se presentan en la tabla 4.14. En las figura 4.12 se puede observar que la columna reforzada con PRFC tiene una capacidad de carga mayor a la no reforzada. Es decir, se ha recuperado la capacidad de diseño de la columna agrietada.

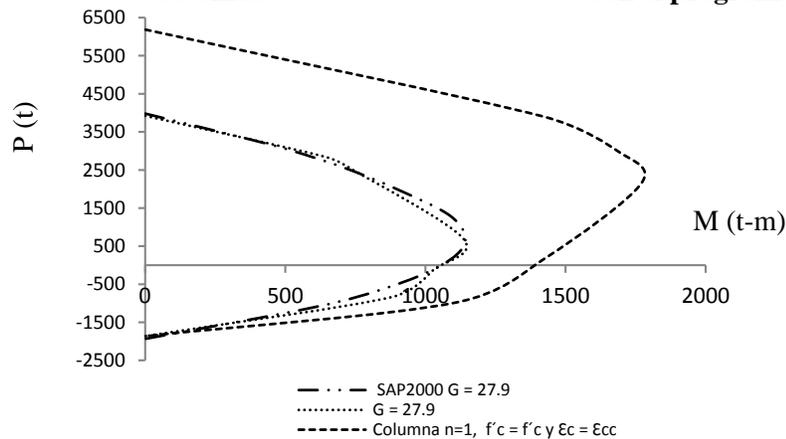
Tabla 4.14. Condiciones de análisis para la columna CV 14

	Sin daño	Agrietada	Caso 1 (F1)	Caso 2 (F2)
Diámetro	180 cm	Grieta = 27.9 cm	180 cm	180 cm
Recubrimiento	9 cm	9 cm	9 cm	9 cm
Refuerzo longitudinal	28 paquetes de dos barras #10			
$f'c$	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	250 kg/cm ²	266.11 kg/cm ²
$\epsilon_c = \epsilon_{cc}$	0.003	0.003	0.006399	0.006399



a) Diagramas de interacción obtenidos

b) Diagramas de interacción obtenidos con el programa SAP2000



c) Comparación de capacidad de la columna

Figura 4.12. Diagramas de interacción columna CV 14

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se evaluó la capacidad de carga a flexo-compresión de columnas pertenecientes a un puente vehicular. Las columnas presentaban daño en forma de agrietamiento vertical. Para evaluar la capacidad de columnas agrietadas se propuso disminuir el área transversal de concreto en función de la profundidad de grieta. También, se encontró que el refuerzo transversal en capiteles era escaso. Para reparar los elementos se optó por reforzarlos con PRFC. El objetivo fue recuperar su capacidad de diseño. Además, en este trabajo se incluyeron algunos ejemplos de refuerzo con PRF.

De acuerdo con el análisis y los supuestos que se consideraron para las columnas agrietadas se logró recuperar al menos su capacidad de diseño. La resistencia de carga otorgada a flexo-compresión por el PRFC se logró mediante el confinamiento con una capa de PRFC. La falla del concreto se produce a una deformación unitaria de 0.003, sin embargo el refuerzo de confinamiento en las columnas incremento este límite hasta 0.006. Esto quiere decir que el incremento en la capacidad de carga a flexo-compresión con este tipo de refuerzo está asociado a un incremento en la deformación unitaria del concreto.

El refuerzo en capiteles necesario para cubrir la falta de refuerzo resulto ser de 3 capas de PRFC.

El criterio que se consideró para evaluar la capacidad de columnas agrietadas es muy conservador ya que depende de la profundidad de grieta.

Se demostró en los ejemplos que el refuerzo con PRF aumenta razonablemente la capacidad de carga de los elementos reforzados. Sin embargo este incremento debe limitarse de acuerdo a las ecuaciones presentadas en el ACI 440.2R -08. Debido a que pasando cierto límite de deformación los elementos reforzados presenta un comportamiento poco predecible y potencialmente peligroso.

A partir de las conclusiones anteriores se propone realizar estudios que permitan evaluar con certeza la capacidad de elementos estructurales con daño. Cuando se pretenda reforzar algún elemento con PRF se recomienda seguir los lineamientos de las normas y fabricantes (ACI 440.2R -08).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Wolf, R., y Miessler, H.J., 1989, “HLV-Spannglieder in der Praxis,” Erfahrungen Mit Glasfaserverbundstaben, Alemania.
2. Fardis. M.N., y Khalili, H., 1981, “Concrete Encased in Fiberglass Reinforced Plastic,” American Concrete Institute, EUA.
3. Bank (2006), “Composites for Construction Structural Design with FRP Materials”, John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, EUA.
4. ACI 440.2R-08, (2008), “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”, American Concrete Institute, EUA.
5. González M. y Robles F., (2005), “Aspectos fundamentales del concreto reforzado”, Editorial Limusa, México.
6. CSI, (2015), “SAP2000, Structural analysis program V. 18”, Computers and structures, Inc., Berkeley, EUA.
7. NTCC-2004, (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto, del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal”, México.

APÉNDICE A

A.1. EJEMPLOS

A.1.1 Refuerzo a flexión

Se presenta el ejemplo 15.3 refuerzo a flexión de la guía (ACI 440.2R-08). Se pretende incrementar en un 50 % el valor de la carga viva a la que está sometida una viga de concreto ubicada interiormente. Esto repercute directamente en la resistencia del miembro, no es necesario incrementar la resistencia a cortante ni realizar revisiones adicionales. Sin embargo, es necesario incrementar la resistencia a flexión. En la tabla A.1 se presentan las propiedades de la viga a reforzar.

Tabla A.1 Datos de la viga

Longitud de la viga	7.32 m
Ancho de la viga	30.5 cm
Peralte efectivo	54.6 cm
Peralte	60.96 cm
$f'c$	351.8 kg/cm ²
f_y	4221 kg/cm ²
ϕM_n	40.58
Refuerzo	3 # 9

En la tabla A.2 se resumen las cargas y los momentos flexionantes asociados a la viga.

Tabla A.2 Propiedades del PRF

Cargas/momentos	Cargas existentes (t)	Cargas esperadas (t)
Cargas muertas	148.8	148.8
Carga viva	178.38	268.1
Cargas no factoradas	327.22	416.92
Cargas no reforzada	-	364.93
Cargas factorizadas	463.81	607.54
Momento de carga muerta	9.99	9.99
Momento de carga viva	11.93	17.94
Momento de carga de servicio	21.81	27.93
Momento no reforzada	-	24.46
Momento ultimo M_u	30.989	40.67

La viga será reforzada con del PRF especificado en la tabla A.3, el refuerzo se proporcionara en dos capas de 30.5 cm x 7 m.

Tabla A.3 Propiedades del PRF

Espesor de la fibra	1.02 mm
Esfuerzo ultimo a tensión	6332.44 kg/cm ²
Deformación unitaria a la ruptura	0.015 mm/mm
Módulo de elasticidad	377295 kg/cm ²

A a continuación se presentan los cálculos requeridos para determinar el refuerzo de la viga (ACI 440.2R-08).

<p>Paso 1. Cálculo de las propiedades de diseño de los materiales PRF. La viga se encuentra en el interior por lo tanto el factor de reducción ambiental tiene un valor de 0.95 (ACI 440.2R-08).</p>	$f_{fu} = 0.95(6332.44) = 6015.78 \text{ kg/cm}^2$ $\varepsilon_{fu} = 0.95(0.015) = 0.01425$
<p>Paso 2. Cálculo de las propiedades del concreto, el acero de refuerzo y el PRF.</p>	$\beta_1 = 1.05 - 0.05 \frac{f'_c}{6.9} = 0.8$ $E_c = 281441.67 \text{ kg/cm}^2$ $A_s = 3(645\text{mm}^2) = 1935$ $A_f = (2\text{capas}) \left(\frac{1.02\text{mm}}{\text{capa}} \right) (305\text{mm}) = 619 \text{ mm}^2$
<p>Paso 3. Determinar el estado actual de deformación. Se calcula suponiendo que la viga esta agrietada y las únicas cargas actuantes sobre la viga son las cargas muertas los datos del análisis existente son $k= 0.334$ y $I_{cr}= 2471 \times 10^6 \text{ mm}^4$</p>	$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(d_f - k_d)}{I_{cr}E_c}$ $\varepsilon_{bi} = \frac{9.99 \times 10^5 (0.6096 - (0.334)(0.546))}{(247100 \text{ cm}^4)(281441.67)}$ $\varepsilon_{bi} = 0.00061$
<p>Paso 4. Calcular la deformación unitaria de diseño del PRF</p>	$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{351.80 \text{ kg/cm}^2}{2(377295)(1.02)}} = 0.009$ $0.009 \leq 0.9(0.0142) = 0.0128$
<p>Paso 5. Calcular la profundidad del eje neutro c, se utilizara un valor inicial de 0.2 d.</p>	$c = (0.2)(54.61 \text{ cm}) = 10.9 \text{ cm}$
<p>Paso 6. Determinar la deformación efectiva del refuerzo PRF y la deformación unitaria del concreto debido a la acción del refuerzo.</p>	$\varepsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{60.96 - 10.92}{10.92} \right) - 0.00061 \leq 0.009$ $\varepsilon_{fe} = 0.0131 > 0.009$

	$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0.009$ <p>Deformación unitaria del concreto</p> $\varepsilon_{fe} = (0.009 + 0.00061) \left(\frac{10.92}{60.96 - 10.92} \right)$ $\varepsilon_{fe} = 0.0021$
<p>Paso 7. Calcular la deformación existente en el acero de refuerzo.</p>	$\varepsilon_s = (0.009 + 0.00061) \left(\frac{54.61 - 10.92}{60.96 - 10.92} \right)$ $\varepsilon_s = 0.0084$
<p>Paso 8. Calcular los esfuerzos en el acero y el PRF.</p>	$f_{fu} = \left(2000000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (0.0084) \leq 4221 \text{ kg/cm}^2$ $f_{fu} = 16800 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} > 4200 \text{ kg/cm}^2$ <p>Por lo tanto, $f_{fu} = 4200 \text{ kg/cm}^2$</p> <p>Esfuerzo en el PRF</p> $f_{fe} = \left(377295 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) (0.009) = 3395.655 \text{ kg/cm}^2$
<p>Paso 9. Calcular las fuerzas externas y revisar el equilibrio de la sección.</p>	$\varepsilon'_c = \frac{1.7(351.8 \text{ kg/cm}^2)}{377295 \text{ kg/cm}^2} = 0.0021$ $\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_s - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_s - 2\varepsilon_c}$ $\beta_1 = \frac{4(0.0021) - (0.0021)}{6(0.0021) - 2(0.0021)} = 0.749$ $\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3\beta_1 \varepsilon_c'^2}$ $\alpha_1 = \frac{3(0.0021)(0.0021) - (0.0021)^2}{3(0.749)(0.0021)^2} = 0.886$ $c = \frac{(19.23)(4200) + (6.19)(3395.655)}{(0.886)(351.8)(0.749)(30.5)}$ $c = 14.29 \text{ cm} \neq 10.9 \text{ cm}$

	Entonces se deben repetir los pasos del 6 al 9 hasta obtener valores de c iguales en los pasos 5 y 9.
<p>Paso 10. Se repitieron los pasos del 6 al 9 hasta alcanzar el equilibrio, los resultados son los siguientes:</p> <p>$c = 13 \text{ cm}; \varepsilon_s = 0.0083;$</p> $f_s = f_y = 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ $\beta_1 = 0.786$ $\alpha_1 = 0.928;$ $f_{fd} = 3388.8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	$c = \frac{(19.23)(4200) + (6.19)(3395.655)}{(0.928)(351.8)(0.786)(30.5)} = 13 \text{ cm}$ <p>Por lo tanto, el valor de “c” es correcto.</p>
<p>Paso 11. Calcular la resistencia a flexión de los componentes. Al refuerzo con PRF se le aplica un factor de reducción $\psi = 0.85$.</p>	<p>La contribución del acero de refuerzo se calcula como:</p> $M_{ns} = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ $M_{ns} = 19.23(4200) \left(54.61 - \frac{0.786(13)}{2} \right)$ $M_{ns} = 39.98 \text{ t} - \text{m}$ <p>La contribución del PRF es:</p> $M_{nf} = A_f f_{fe} \left(d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ $M_{nf} = 6.19(3395.655) \left(60.96 - \frac{0.786(13)}{2} \right)$ $M_{nf} = 11.74 \text{ t} - \text{m}$
<p>Paso 12. Calcular la resistencia a flexión de diseño.</p>	$\phi M_n = \phi (M_{ns} + \psi_f M_{nf})$ $\phi M_n = 0.9(39.98 + 0.85(11.74))$

	$\phi M_n = 44.96 t - m \geq 40.67 t - m$ <p>Por lo tanto, el refuerzo proporcionado es capaz de resistir las nuevas solicitaciones.</p>
<p>Paso 13. Comprobar los esfuerzos de servicio en el acero de refuerzo y el PRF.</p>	<p>Calcular la profundidad elástica hasta el eje neutro, para secciones rectangulares:</p> $k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)^2 + 2 \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \left(\frac{d_f}{d}\right)\right) - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c}\right)}$ $k = 0.343$ $kd = 0.343(54.61) = 18.7 \text{ cm}$ <p>Calcular el nivel de tensión para verificar que se encuentre dentro de los límites:</p> $f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right)\right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) (d - kd) + A_f E_f \left(d_f - \frac{kd}{3}\right) (d_f + kd)}$ $f_{s,s} = 2845.01 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \leq (0.80) \left(4180.84 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 3365.06 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ <p>El esfuerzo de tensión en el acero está dentro de los límites recomendados.</p>
<p>Paso 14. Comprobar el límite de falla del PRF y el nivel de estrés, además se debe verificar que sea menor a los límites. Suponga el 100 % de la carga de servicio, verificar los límites para esfuerzo cíclico de materiales PRFC.</p>	$f_{s,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \left(\frac{d_f + kd}{d + kd}\right) - \varepsilon_{bi} E_f$ $f_{s,s} = 3365.06 \left(\frac{377295}{2000000}\right) \left(\frac{60.96 + 18.7}{54.6 + 18.7}\right) - (0.00061)(377295)$ $f_{s,s} = 387.49 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \leq 0.55 \left(6015.78 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) = 3308.68 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ <p>Por lo tanto el esfuerzo en el PRF está dentro de los límites.</p>

4.3.2 Refuerzo a cortante

Refuerzo a cortante en vigas

Se presenta el reforzamiento de una viga ubicada en el interior de un edificio de departamentos, se requiere un incremento de 5 toneladas en la capacidad de carga a cortante. Un análisis previo de la viga demostró que no es necesario reforzar el miembro a flexión. Las características de la viga se describen en la tabla A.4. Las propiedades de la fibra a utilizar se muestran en la tabla A.5.

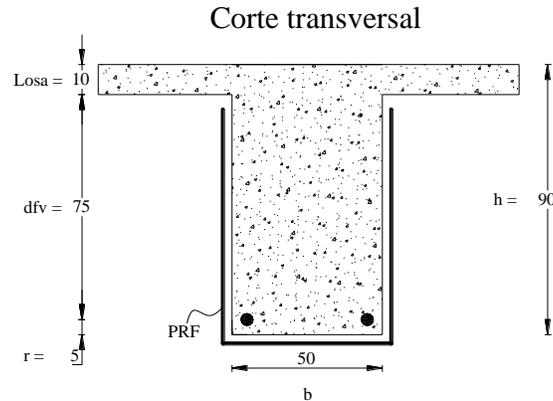


Figura A.2 Configuración del refuerzo (PRF) a cortante.

Tabla A.4 Propiedades de la viga a reforzar

$f'c$	300 kg/cm ²
f_y	4200 kg/cm ²
r	5 cm
d	85 cm
ϕV_n	20 t
VR	25 t

Tabla A.5 Propiedades del PRF

Espesor de la fibra	0.16 mm
Esfuerzo ultimo a tensión	38647 kg/cm ²
Deformación unitaria a la ruptura	0.017 mm/mm
Módulo de elasticidad	2320000 kg/cm ²

Cálculo del refuerzo a cortante

Paso 1. Calcular las propiedades de diseño del PRF. Debido a que la viga se encuentra en el interior el factor de reducción ambiental será 0.95.

$$f_{fu} = 0.95(38647 \text{ kg/cm}^2) = 36714.65 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.95(0.017) = 0.01615$$

Paso 2. Calcular la deformación efectiva al nivel del refuerzo ε_{fe} , para ello deberá calcularse el coeficiente k_v .

$$L_e = \frac{23300}{[(nt_f E_f)]^{0.58}} = \frac{23300}{[(1(0.16)(2320000))]^{0.58}} = 13.7 \text{ cm}$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{254}\right)^{2/3} = \left(\frac{300}{254}\right)^{2/3} = 1.12$$

$$k_2 = \left(\frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}}\right) = \left(\frac{75 - L_e}{75}\right) = 0.81$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11910 \varepsilon_{fu}} = \frac{1.12 * 0.81 * 13.7}{11910 * 0.01615} = 0.065 \leq 0.75$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.065 * 0.01615 = 0.001 \leq 0.004$$

Paso 3. Cálculo de la aportación del refuerzo (PRFC) a la resistencia a cortante.

Área del refuerzo del PRF

$$A_{fv} = 2nt_f w_f = 2 * 1 * 0.1 * 10 = 2 \text{ cm}^2$$

Tensión efectiva

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f = 0.001 * 2320000 = 2320 \text{ kg/cm}^2$$

La contribución se calcula como:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\text{sen} \alpha + \text{cos} \alpha) d_{fv}}{s_f}$$

$$V_f = \frac{2 * 2320 * 1 * 75}{40} = 8737.5 \text{ kg}$$

La resistencia al cortante de la sección se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f) = 0.8(12.58 + 12.42 + 0.85 * 8.74) = 25.94 \text{ t} > 25 \text{ t}$$

Por lo tanto, el refuerzo proporcionado es el necesario para incrementar la capacidad de la sección en 5 toneladas.

Refuerzo a cortante en Columnas

Se presenta el refuerzo a cortante de una columna ubicada en el exterior, el elemento está expuesto a variaciones de temperaturas. Se trata de una columna cuadrada de 40x40 cm. Se requiere un incremento de 30 toneladas en la resistencia a cortante. El sistema de refuerzo seleccionado es a base de fibra de carbono (PRFC). Los datos de la fibra a utilizar se encuentran en la tabla A.6.

Tabla A.6. Propiedades del PRF

Espesor de la fibra	1.3 mm
Esfuerzo ultimo a tensión	7268 kg/cm ²
Deformación unitaria a la ruptura	0.014 mm/mm
Módulo de elasticidad	500500 kg/cm ²

Cálculo del refuerzo a cortante

<p>Paso 1. Calcular las propiedades de diseño del PRF. Debido a que la columna se encuentra en el exterior el factor de reducción ambiental será 0.65.</p>	$f_{fu} = 0.65(7268 \text{ kg/cm}^2) = 4724.2 \text{ kg/cm}^2$ $\varepsilon_{fu} = 0.65(0.014) = 0.0091$
<p>Paso 2. Calcular el nivel de deformación efectivo en el refuerzo de PRF.</p>	$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75(0.0091) = 0.006825$ <p>Por lo tanto se usa el limite 0.004</p>
<p>Paso 3. Determinar el área de PRF requerido, el cálculo se puede hacer a partir del aumento en la fuerza que se requiere, el factor de reducción para elementos completamente envueltos es $\Psi_f = 0.95$.</p> $V_f = \frac{\Delta V_u}{\Phi(\Psi_f)}$ <p>El área requerida puede ser calculada reorganizando la ecuación 2.3.2</p> $A_{fvreqd} = \frac{V_{fvreqd} S_f}{\varepsilon_{fe} E_f (sen\alpha + cos\alpha)(d_f)}$	$V_f = \frac{30000}{0.85(0.95)} = 37151.70 \text{ kg}$ $A_{fvreqd} = \frac{(37151.70 \text{ kg}) S_f}{(0.004) \left(500500 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right) (1)(40 \text{ cm})} = 0.4639 S_f$
<p>Determinar el número de capas anchura y espaciado del refuerzo con PRF</p> $n = \frac{A_{fv,reqd}}{2t_f w_f}$	$n = \frac{0.4639 S_f}{2(0.13 \text{ cm}) w_f} = 1.784 \frac{S_f}{w_f}$ <p>Por lo tanto para incrementar la resistencia a cortante de la columna en 30 t deberán utilizarse dos capas continuas de PRFC en todo el elemento.</p>

A.3.3 Refuerzo a carga axial

Una columna de 65 x 65 cm requiere un aumento de 150 toneladas en su capacidad de carga axial. Las propiedades de la columna y los detalles del armado se presentan en la tabla A.7.

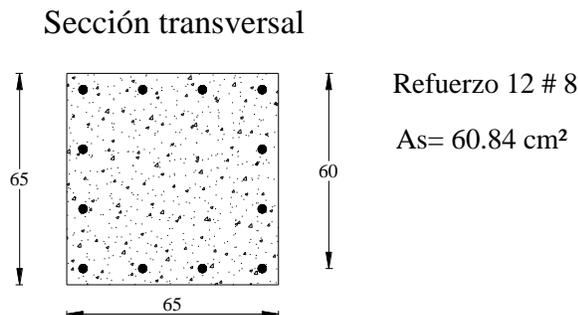


Figura A.3 Sección transversal de la columna a reforzar

Tabla A.7. Propiedades de la columna a reforzar

f'_c	400 kg/cm ²
f_y	4200 kg/cm ²
r	5 cm
refuerzo	12 # 8
A_g	4225
A_s	60.84
Pg, %	1.4 %
ϕP_n sin PRF	1006.67 ton
ϕP_n (req)	1156.67 ton

Se eligió un PRF basado en fibra de carbono, las propiedades se presentan en la tabla A.8.

Tabla A.8 Propiedades del PRF

Espesor de la fibra	1 mm
Esfuerzo ultimo a tensión	6320 kg/cm ²
Deformación unitaria a la ruptura	0.018 mm/mm
Módulo de elasticidad	3518000 kg/cm ²

Cálculo del refuerzo para incrementar la capacidad a carga axial

Paso 1. Calcular las propiedades de diseño del PRF. Debido a que la columna se encuentra en el interior el factor de reducción ambiental será 0.95	$f_{fu} = 0.95(6320 \text{ kg/cm}^2) = 6004 \text{ kg/cm}^2$ $\varepsilon_{fu} = 0.95(0.018) = 0.0171$
Paso 2. Determinar la resistencia máxima del concreto confinado	$f'_{cc} = \frac{1}{0.85(A_g - A_{st})} \left(\frac{\phi P_{nreq}}{0.80\phi} - f_y A_{st} \right)$ $f'_{cc} = \frac{1}{0.85(4225 - 60.84)} \left(\frac{1156670}{0.8 * 0.65} - 4200(60.84) \right) = 556.24 \text{ kg/cm}^2$
Paso 3. Obtener esfuerzo máximo de confinamiento en el PRF	$f_l = \frac{f'_{cc} - f'_c}{3.3k_a}$ $f_l = \frac{556.24 - 400}{3.3k_a} = 89.29 \text{ kg/cm}^2$ $k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2$ $k_a = 0.53(1)^2 = 0.53$ $\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\left(\frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right]}{3A_g} - \rho_g}{1 - \rho_g}$

	$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\frac{\left(\frac{65}{65}\right)(65 - 2(5))^2 + \left(\frac{65}{65}\right)(65 - 2(5))^2}{3(4225)} \right] - 0.0144}{1 - 0.014} = 0.53$
<p>Paso 4. Determinar el número de capas del refuerzo con PRF</p>	$n = \frac{f_l \sqrt{b^2 + h^2}}{\Psi_f 2 E_f t_f \varepsilon_{fe}}$ $\varepsilon_{fe} = 0.55 * 0.0171 = 0.0094$ $n = \frac{89.29 \sqrt{65^2 + 65^2}}{0.95 * 2 * 3518000 * 0.1 * 0.0094} = 1.3$ <p>Revisando la relación mínima de confinamiento</p> $\frac{f_l}{f'_c} = \frac{89.29}{400} = 0.223 \geq 0.08 \text{ Cumple}$ <p>Por lo tanto deberán utilizarse 2 capas continuas en todo el elemento.</p>
<p>Paso 5. Verificar que la deformación unitaria del concreto confinado sea:</p> $\varepsilon_{ccu} \leq 0.01$	$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1.5 + 12 k_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0.45} \right)$ $k_b = k_a$ $k_b = 0.53$ $\varepsilon_{ccu} = 0.002 \left(1.5 + 12 * 0.53 * \frac{89.29}{400} \left(\frac{0.0094}{0.002} \right)^{0.45} \right)$ $\varepsilon_{ccu} = 0.0087 \leq 0.01$ <p>Al revisar que la deformación unitaria cumpla con este límite, se asegura el buen comportamiento del refuerzo.</p>

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Yolanda y Simón. Gracias por todo lo que me han enseñado.

A todas aquellas personas que me conocen y me han brindado su apoyo y confianza, gracias.

Al Dr. José Alberto Escobar Sánchez, porque me ha guiado durante esta etapa. Además, de que me alienta continuamente a mejorar, muchas gracias.

A la UNAM y a el PUEI por darme la oportunidad de estudiar una especialidad.