

Proyecto Final

Refuerzo Estructural de Elementos de
Hormigón con Fibras de Carbono (PRFC)

Matías G. Argento

Tutor: Prof. Jorge Sota

Concordia, Agosto del 2015

Agradecimientos:

A mi familia y mi novia, por el constante apoyo a lo largo de estos años, por inspirarme y motivarme a dar siempre lo mejor de mí.

Al tutor de mi tesis, Prof. Jorge Sota, por su dedicación en guiarme en este trabajo, compartir conmigo sus conocimientos y amplia experiencia en la investigación a lo largo de estos años.

Al docente a cargo de la cátedra, Ing. Fabián Avid, por recomendarme continuar mi trabajo de investigación previo y con éste, darme la oportunidad de cerrar mi carrera. Además, por estar siempre a disposición de los alumnos y contribuir a la formación permanente de los estudiantes.

A aquellos docentes de la Universidad Tecnológica Nacional, quienes día a día marcan una diferencia en la enseñanza con su formación y dedicación, ofreciendo toda su sabiduría sin guardarse nada.

A mis amigos y compañeros, con los que hemos compartido momentos increíbles en estos años como estudiantes y con los que creamos una amistad verdadera y duradera.

Las palabras nunca van a ser suficientes para expresar mi aprecio y agradecimiento a todas las personas que formaron parte de esta etapa de mi vida. A todos ellos, muchas gracias.

Índice

Capítulo 18	
INTRODUCCIÓN	8
1.1 Motivación	9
1.2 Resumen	9
1.3 Objetivos	10
Capítulo 2	
MATERIALES COMPUESTOS	11
2.1 Antecedentes	12
2.2 Materiales Compuestos. Polímeros reforzados con fibra de carbono (PRFC)	16
2.2.1 <i>Materiales compuestos de matriz polimérica</i>	17
2.2.2 <i>Descripción de las fibras</i>	20
2.3 Sistema de Refuerzo	25
2.3.1 <i>Situación del mercado actual</i>	26
2.3.2 <i>Material prefabricado</i>	26
2.3.2 <i>Materiales de tejidos de fibras</i>	31
2.3.3 <i>Acotaciones finales</i>	34
Capítulo 3	
ENSAYOS Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS	36
3.1 Introducción	37
3.2 Caracterización de las Fibras	38
3.3 Caracterización de matrices y adhesivos	39
3.4 Caracterización del material compuesto	39
3.4.1 <i>Determinación de la densidad y volumen de fibras</i>	39
3.4.2 <i>Propiedades mecánicas a tracción</i>	40
3.4.3 <i>Propiedades mecánicas a compresión</i>	41
3.4.4 <i>Propiedades mecánicas a flexión</i>	43
3.4.5 <i>Propiedades mecánicas a cortadura plana</i>	44
3.4.6 <i>Resistencia interlaminar a corte</i>	45

Capítulo 4

ENSAYOS SOBRE ELEMENTOS ESTRUCTURALES 47

4.1 Introducción 48

4.2 Tipos de falla 48

4.3 Ensayos a flexión sobre vigas reforzadas con PRFC 51

4.4 Ensayos de corte sobre vigas reforzadas con PRFC 55

4.5 Ensayo sobre paneles de hormigón reforzados con fibras de carbono sometidos a cargas explosivas 58

4.6 Ensayo de comportamiento a fatiga de hormigón reforzado con PRFC bajo cargas de flexión cíclica. 64

4.7 Ensayos sobre vigas de hormigón reforzadas con mallas de fibras de carbono. 67

4.7.1 Introducción 67

4.7.2. Viga reforzada con tres barras $\phi 10\text{mm}$ 72

4.7.3 Viga reforzada con malla de fibras de carbono de abertura chica 73

4.7.4 Viga reforzada con malla de fibras de carbono de abertura grande 75

4.7.5 Comparación entre refuerzo con barras de acero y con fibras de carbono 76

4.7.6 Conclusiones 78

4.8 Ensayos parcialmente destructivos 79

4.8.1 Ensayo de adherencia por tracción directa (pull-off) 79

4.9 Ensayo sobre probetas de hormigón confinadas con PRFC 81

4.9.1 Introducción 81

4.9.2 Programa experimental 81

4.9.3 Proceso de aplicación del refuerzo de PRFC 82

4.9.4 Resultados 85

4.9.5 Conclusiones 85

Capítulo 5

CRITERIOS DE DISEÑO Y CÁLCULO 87

5.1 Introducción 88

5.2 Recomendaciones generales de diseño 89

Refuerzo Estructural de Elementos de Hormigón con Fibras de Carbono (PRFC).

5.2.1 ACI 440	89
5.2.2 Boletín 14 de la FIB	93
5.2.3 Comparación entre la ACI – FIB	97
5.3 Criterios para el refuerzo a flexión de vigas. ACI 440	99
5.3.1 Introducción	99
5.3.2 Hipótesis de diseño	99
5.3.3 Resistencia nominal	100
5.3.4 Tipos de falla según la ACI	101
5.3.5 Nivel de deformación en el refuerzo de PRFC	101
5.3.6 Factor de reducción de resistencia	102
5.3.7 Capacidad de servicio	103
5.3.8 Aplicación a una sección rectangular reforzada	103
5.3.9 Conclusiones del ACI	106
5.4 Criterios para el refuerzo a corte de vigas. ACI 440	108
5.4.1 Consideraciones generales	108
5.4.2 Esquemas de revestimiento	108
5.4.3 Resistencia nominal a corte	109
5.4.4 Contribución del sistema de PRFC al corte	109
5.4.5 Resumen	112
5.5 Procedimiento de cálculo con el programa utilizado por Sika	113
Capítulo 6	
EJECUCIÓN Y APLICACIÓN EN OBRA	129
6.1 Introducción	130
6.2 Ejecución del refuerzo con laminados pultruidos longitudinales	131
6.2.1 Descripción del sistema	131
6.2.2 Consideraciones previas generales	132
6.2.3 Consideraciones previas para una buena unión	132
6.2.4 Medidas de seguridad en la obra	133
6.2.5 Preparación del soporte de hormigón	134
6.2.6 Mezclado de la resina epoxi	135
6.2.7 Aplicación del refuerzo de PRFC	136
6.2.8 Recubrimiento de los laminados	140
6.2.9 Inspección	141
6.3 Ejecución del refuerzo con laminados pultruidos en “L”	142

Refuerzo Estructural de Elementos de Hormigón con Fibras de Carbono (PRFC).

6.3.1 Consideraciones previas	142
6.3.2 Preparación del soporte	142
6.3.3 Anclaje	142
6.3.4 Proceso de ejecución	143
6.4 Ejecución del refuerzo con tejidos de PRFC curados in-situ	145
6.4.1 Descripción del sistema	145
6.4.2 Consideraciones previas generales	145
6.4.3 Consideraciones previas para una buena unión	146
6.4.4 Medidas de seguridad en la obra	146
6.4.5 Preparación de la superficie	146
6.4.6 Aplicación en seco	147
6.4.7 Aplicación húmeda	150
6.4.8 Mezclado de la resina epoxi	154
6.4.9 Recubrimiento con pintura	155
6.4.10 Curado	155
6.4.11 Inspección	155
6.5 Aplicación de los sistemas de PRFC	156
6.5.1 Defectos del proyecto o de la ejecución del mismo	156
6.5.2 Incrementos de cargas	158
6.5.3 Renovar estructuras antiguas	160
6.5.4 Cambios en la propia forma de la estructura	161
6.5.5 Daños en la estructura	162
6.5.6 Mejorar las condiciones de servicio actuales	164
6.6 Esfuerzos solicitantes que pueden presentarse	166
6.6.1 Refuerzo a flexión	167
6.6.2 Refuerzo de corte	169
6.6.3 Refuerzo al confinamiento	169
6.6.4 Refuerzo de muros	170
6.7 Análisis de precios. Comparación	172
6.7.1 Refuerzo de un puente. Esquema estructural	172
6.7.2 Vistas del puente con el refuerzo terminado	173
6.7.3 Alternativas de refuerzo estructural	174
6.7.4 Comparación de costos	174
6.7.5 Refuerzo de una viga de H°A°	175
6.8 Notas finales	176

Capítulo 7

EXPERIENCIAS EN ARGENTINA 177

7.1 Introducción 178

7.2 Refuerzo estructural del Banco Multinacional en Tierra del Fuego,
Argentina 179

7.2.1 Descripción del proyecto 179

7.2.2 Requerimientos del proyecto 179

7.2.3 Soluciones Sika 180

7.2.4 Participantes del proyecto 180

7.3 Refuerzo estructural del Hotel Internacional 5 estrellas en Recoleta,
Argentina 181

7.3.1 Descripción del proyecto 181

7.3.2 Requerimientos del proyecto 181

7.3.3 Soluciones Sika 182

7.3.4 Participantes del proyecto 183

7.4 Refuerzo estructural de Salón de ventas, Zona Norte, Argentina 184

7.4.1 Descripción del proyecto 184

7.4.2 Requerimientos del Proyecto 185

7.4.3 Soluciones Sika 185

7.4.4 Trabajos realizados 186

7.4.5 Participantes del Proyecto 186

7.5 Refuerzo estructural en Edificio de viviendas, Capital Federal, Argentina 187

7.5.1 Descripción del proyecto 187

7.5.2 Requerimientos del proyecto 188

7.5.3 Soluciones Sika 188

7.5.4 Trabajos realizados 189

7.5.6 Participantes del proyecto 189

Capítulo 8

CONCLUSIONES 190

BIBLIOGRAFÍA 193

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Este trabajo de investigación fue realizado en el marco del Proyecto Final de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Concordia.

Nace como propuesta del docente a cargo de la cátedra, Ing. Civil Fabián Avid, y aceptada con gusto por mí, con el objetivo de profundizar el trabajo de investigación que he realizado en Alemania meses atrás. El tutor de este trabajo de investigación fue el Prof. Jorge Sota, quien junto al docente a cargo de la cátedra, me guiaron y apoyaron en la realización del mismo.

1.2 Resumen

Los polímeros reforzados con fibra de carbono (PRFC) se utilizan hace ya varios años para la rehabilitación estructural de estructuras de hormigón. Existen básicamente dos técnicas para la instalación del refuerzo de PRFC: la primera es interna, y puede ser montado cerca de la superficie de hormigón ya endurecido (del inglés, *near surface mounted* o NSM) o bien utilizado como refuerzo interno en la etapa de hormigonado; la otra es como refuerzo externo (del inglés, *externally bonded reinforcement* o EBR) ligado a la superficie de hormigón con un pegamento especial.

En el presente trabajo se compara la eficacia de las dos técnicas mencionadas y su aplicación a estructuras con problemas donde pueda ser necesario su uso. Muchas veces, estos problemas pueden incluir la necesidad de un aumento en la capacidad portante de una estructura, o bien la pérdida de capacidad de carga (Ej. Un sismo). Otras veces, la estructura puede haber sido mal diseñada o el hormigón tener una resistencia menor a la establecida en el cálculo estructural. Para estas situaciones existe la posibilidad de aumentar considerablemente la resistencia a flexión y/o corte de los elementos estructurales comprometidos o su rehabilitación para la puesta en servicio con la técnica EBR o NSM.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar los polímeros reforzados con fibra de carbono (PRFC) como material para la construcción y la utilidad que se le puede dar a los mismos en ese ámbito. Se estudiarán los métodos de cálculo, procedimientos constructivos para la ejecución en obra, sus ventajas y desventajas con respecto al refuerzo tradicional con barras de acero, y se mostrarán los casos de aplicación en nuestro país y ensayos realizados con sus respectivas conclusiones.

Debe servir a su vez como guía para reconocer situaciones en las que podría ser útil la utilización de estos materiales y para establecer soluciones constructivas al problema en cuestión.

Capítulo 2

MATERIALES COMPUESTOS

2.1 Antecedentes

El polímero reforzado con fibra de carbono o “PRFC” es un polímero que contiene fibras de carbono en su estructura, lo que lo hace un material rígido, con un alto modulo de elasticidad y resistencia a la tracción y una elevada relación resistencia / peso. Estos PRFC forman parte de los denominados materiales compuestos o “composites”.

Estos materiales compuestos se utilizan desde hace aproximadamente 40 años principalmente en la industria aeronáutica, luego pasaron al campo del automovilismo y las telecomunicaciones. En el presente se utilizan también en la ingeniería civil dadas sus ventajas y características como material estructural.

En las últimas décadas, la tecnología aeronáutica y el ámbito espacial han evolucionado y le han ido brindando un papel muy importante a los materiales compuestos de alto rendimiento. En la aeronáutica, los materiales compuestos se utilizan para fabricar piezas estructurales, gracias a sus prestaciones, sus cualidades de ligereza y su flexibilidad de forma. Los materiales compuestos también tienen muy buena resistencia a la corrosión, lo cual reduce en consecuencia los gastos de mantenimiento. Sin duda que la industria aeronáutica, seguida a cierta distancia por la automoción, ha sido la líder en investigación y desarrollo de materiales compuestos. En esta industria imperan las propiedades de los materiales por encima de su costo, lo que permite ciertas innovaciones que en otros sectores serían impensables [4].



Figura 2.1: Aplicaciones varias de la fibra de carbono.



Figura 2.1: Airbus A380 fabricado a base de fibra de carbono.*

En la industria de la construcción, los materiales tradicionales ejercen una competencia muy fuerte en el sector (hormigones, metales, cerámicas, etc.). Sus prestaciones son muy bien conocidas por todas las personas de este ámbito. A nivel estructural, la aplicación de materiales compuestos ha abierto un mercado importante en este sector. Precisamente es este campo y en Estados Unidos donde se encuentran los mayores avances en la investigación del uso de materiales compuestos para la construcción. Los materiales compuestos proporcionan una alta capacidad de carga con bajo peso de material. Esta característica de los materiales compuestos evita gastos con equipamientos pesados y reduce considerablemente el tiempo de instalación. Los materiales compuestos son también muy durables, muchos no se corroen como el acero ni se pudren como la madera, de modo que los costos de mantenimiento son significativamente menores [4].

Algunos ejemplos de aplicación de los materiales compuestos en las estructuras de la construcción son los siguientes [6]:

- Restauración de estructuras mediante impregnaciones de láminas de carbono/epoxi precuradas o curadas in situ, adheridas a los elementos estructurales comprometidos para aumentar su capacidad de carga o su nueva puesta en servicio.

- Refuerzos de materiales compuestos para elementos de hormigón, como espigas de metal, barras de refuerzos, tendones de postensado, entre otros.

- Cables “activos”; son la última generación de ascensores. El modelo presenta cables de aramida, con la mitad de peso, el doble de resistencia y capacidad de monitorización de deformaciones (lo que permite actuar rápidamente ante un posible percance).

- Sistemas de unión “activos”; Materiales con memoria de forma. Enfriando cambian la forma y al volver a temperatura ambiente recuperan la forma inicial. Por ejemplo remaches.

- Cimentaciones “activas”, formadas por materiales compuestos electroreológicos, materiales normalmente líquidos pero que con el paso de la corriente eléctrica se vuelven sólidos. En caso de sismo deja de pasar corriente a través del material con lo que algunas cimentaciones se vuelven líquidas y consiguen un conjunto más flexible, con un resultado positivo para movimientos sísmicos.

El refuerzo o rehabilitación de estructuras de hormigón armado existentes para resistir nuevas cargas de uso, corrección de daños, deterioro de elementos estructurales o aumento de la ductilidad se han venido resolviendo de forma tradicional con el uso de técnicas constructivas y materiales convencionales. Chapas de acero encoladas exteriormente, encamisados de acero u hormigón y postensados exteriores son algunas de las técnicas tradicionales disponibles [11].

Los materiales compuestos realizados de fibra en una resina polimérica, también conocidos como polímeros reforzados con fibra (PRF), han emergido como una alternativa a las técnicas y materiales tradicionales. Para el objetivo de este trabajo, un sistema de PRF se define como todas las fibras y resinas usadas para crear los laminados y tejidos de materiales compuestos, todas las resinas empleadas para adherirlo al elemento de hormigón armado y todas las capas aplicadas usadas para proteger el material constituyente. En algunos casos, estas capas pueden tener un uso exclusivamente estético.

Los materiales compuestos PRF son livianos, no se corroen y presentan alta resistencia a tracción. Además, estos materiales se encuentran disponibles en un rango variado de formas desde laminados realizados en fábrica hasta tejidos de fibras que pueden ser moldeadas in situ para ajustarse a la geometría de la estructura antes de añadir la resina polimérica. El perfil delgado de los sistemas de PRF es comúnmente deseado en aplicaciones donde la estética o la accesibilidad son una preocupación [11].



Figura 2.2: Muestras de PRF en diferentes configuraciones para refuerzos estructurales [13].

Ha habido un creciente interés en estos sistemas para refuerzo de estructuras y esto puede ser atribuido a algunos factores. A pesar de que las fibras y resinas utilizadas en los sistemas PRF son relativamente caros en comparación con los refuerzos tradicionales con hormigón y acero, los costos de mano de obra y medios auxiliares para instalar un sistema PRF son generalmente más bajos. Los sistemas PRF pueden también utilizarse en áreas de accesibilidad limitada que dificulte la puesta en práctica de las técnicas tradicionales [10].

No hace mucho tiempo atrás la aplicación de materiales compuestos era prácticamente inexistente. Las ventajas de estos materiales se hicieron cada vez más evidentes al empezar a aplicarlos en diversas construcciones sometidas a las acciones de ambientes agresivos, plataformas marinas, depósitos, anclajes al terreno, construcciones no conductivas y no magnéticas, refuerzos de estructuras, armaduras pasivas, armaduras activas, cables, recubrimiento de túneles y pasarelas.

A nivel mundial, la primera estructura mediante láminas encoladas de materiales compuestos PRF con fibra de carbono data de 1991: el puente Ibach, en Lucerna (Suiza). A lo largo de los siguientes años se continuaron realizando algunos refuerzos en diferentes estructuras, de una manera todavía experimental. En 1995 se empezó a utilizar este tipo de sistemas de una manera sistemática. Se comenzaron a comercializar los primeros sistemas de refuerzo por parte de distintas empresas, principalmente en Suiza y Alemania [12].

El presente trabajo se estudiarán los polímeros reforzados con fibra de carbono, y su aplicación como refuerzo en elementos estructurales de hormigón armado de cemento portland.

2.2 Materiales Compuestos. Polímeros reforzados con fibra de carbono (PRFC)

Los materiales compuestos están formados por dos partes, una matriz y un refuerzo, que actúan de manera conjunta y solidaria. En los PRFC el refuerzo es la fibra de carbono, la cual le provee resistencia mecánica, rigidez, dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas. Es la que soportará las cargas impuestas al material [7].

La matriz ligante es por lo general una resina plástica similar a un epoxi, aunque también se suelen utilizar otros polímeros plásticos o termoplásticos como el poliéster, vinilo o nylon. Su papel principal es transmitir los esfuerzos al refuerzo, tiene la función de aglomerante y protección del mismo. A su vez, aporta mayor flexibilidad y le proporciona forma. Como es de esperar, tiene menor resistencia que el refuerzo [7].

El compuesto puede poseer también otras fibras como el kevlar, aramida, aluminio, fibra de vidrio, entre otros. Las propiedades finales del PRFC pueden también ser afectadas por el tipo de aditivos introducidos en la matriz ligante. El aditivo más utilizado es la sílice, pero existen otros como la goma o los micro tubos de carbono. Ya que los PRFC se componen de dos elementos diferentes, sus propiedades dependen de estos dos elementos [7].

REFUERZO	MATRICES
Cerámicas (carburo de silicio, alúmina)	Matrices Inorgánicas (cemento, yeso)
Metálicas	Matrices Termoestables (epoxi, viniléster, poliéster, fenólica)
Orgánicas (aramida, polietileno)	Matrices Termoplásticas (polipropileno, policarbonato, acetato)
Inorgánicas (carbono, vidrio, boro)	

Tabla 2.3: Materias primas de los materiales compuestos [7].

Las características finales de un material compuesto dependen de las propiedades de las fases, de la proporción en que se encuentran cada una de ellas, de la geometría (forma, tamaño, orientación) y grado de dispersión de la fase dispersa en la matriz. Existen clasificaciones de los materiales compuestos en función de cada una de sus fases [7]:

Dependiendo del tipo de matriz empleado

- Compuestos de matriz polimérica (PMC): Resinas de poliéster y resinas epoxis reforzadas con fibra de vidrio, fibra de carbono o fibra de aramida.
- Compuestos de matriz metálica (MMC): Aleaciones de aluminio, titanio y magnesio.
- Compuestos de matriz cerámica (CMC): Alúmina, carburo de silicio.

Dependiendo del tipo de refuerzo empleado

- Compuestos particulados: Partículas en una matriz.
- Compuestos fibrosos: Fibras en una matriz.
- Compuestos laminados: Capas o láminas alternadas de las fases.

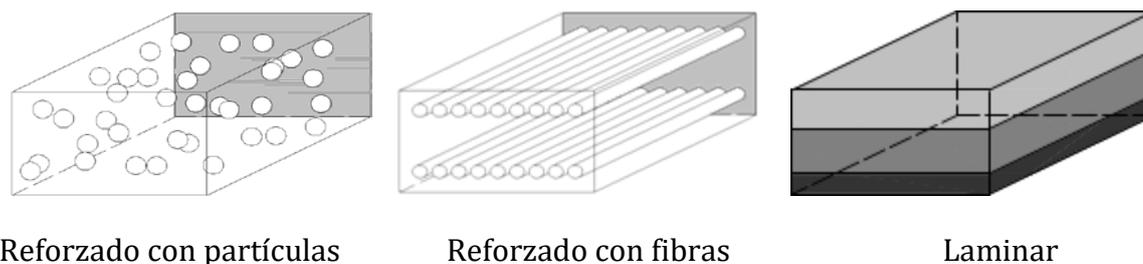


Figura 2.4: Materiales compuestos en función del tipo de refuerzo [7].

Los compuestos de matriz polimérica corresponden al grupo de materiales compuestos más empleado en el refuerzo de estructuras de hormigón armado, por lo que a continuación se estudiará de forma más ampliada y se analizarán las características que les proporcionan su aplicación en la práctica de los refuerzos de estructuras.

2.2.1 Materiales compuestos de matriz polimérica

Descripción de las matrices

La matriz de un material compuesto puede ser de tipo termoestable o de tipo termoplástica, siendo el primero el tipo más común. La función de esta matriz es la protección de las fibras contra la abrasión y corrosión del entorno, unir el conjunto de fibras y distribuir la carga. La matriz tiene una fuerte influencia en muchas características mecánicas del composite, como la resistencia, las propiedades a cortante y a compresión. Las características físicas y químicas de la matriz como la temperatura de fusión y curado,

viscosidad y reactividad con las fibras influyen en la elección del proceso de fabricación. De ahí que la apropiada selección del material matriz para un sistema compuesto requiere que todos estos factores sean tenidos en cuenta [1].

Las resinas epoxi, poliéster y viniléster son las matrices poliméricas más comunes utilizadas con las fibras de refuerzo de alto rendimiento. Son polímeros termoestables con buena procesabilidad y buena resistencia química. Las resinas epoxis tienen, en general, mejores propiedades mecánicas que el poliéster y vinilester, y una durabilidad excepcional, en tanto que poliéster y vinilester resultan más económicas [1].

La función del adhesivo o resina es formar y conformar el material compuesto, y transmitir los esfuerzos rasantes movilizados entre el soporte a reforzar y el esqueleto de las fibras resistentes.

Para una adherencia perfecta es necesario determinar: materiales a adherir, relación y requisitos de mezcla, tecnología de aplicación, temperatura y humedad de curado, técnicas de preparación de superficies, coeficientes de expansión térmica, fluencia, abrasión y resistencia química y viscosidades en adhesivos.

Hay conceptos importantes ligados a la naturaleza de los adhesivos [1]:

- Tiempo límite de aplicación: es el tiempo límite de aplicación después de la mezcla de los dos componentes, debido a que comienza a endurecer la resina. Depende de la temperatura ambiente, cantidad de producto mezclado y tipo de resina.
- Tiempo abierto: tiempo límite después de la aplicación del adhesivo sobre las superficies a unir, para adherir el material de refuerzo.
- Temperatura de transición vítrea: temperatura de pérdida de las propiedades, comportamiento vítreo a plástico sin prestaciones mecánicas. Esta temperatura es diferente para distintos polímeros y combinación. Está inversamente ligado a la elasticidad del polímero.

El uso de los adhesivos de naturaleza epoxi tiene los siguientes fundamentos [1].

- Perfecta adherencia sobre una cantidad de superficies, especialmente superficies minerales, hormigón, mampostería, piedra.
- Largo tiempo abierto, facilitando los trabajos de puesta en obra.
- Elevada cohesión interna y adherencia.
- Posibilidad de elastificación, mediante adiciones.

- No forma subproductos tras el endurecimiento.
- Baja retracción en comparación a resinas de poliéster, vinilester y acrílicas.
- Baja fluencia, ni fatiga bajo carga sostenida.
- Formulación con tixotropía para trabajos en vertical.
- Capacidad de unión de superficies irregulares.

Los adhesivos estructurales empleados en la construcción son generalmente de naturaleza epoxídica. Según su uso, requiere adición de fillers, fluidificantes, tixotropantes, promotores de adherencia, aditivos y pigmentos, entre otros. Las resinas epoxi bicomponentes deben tener la viscosidad y consistencia de acuerdo al modo de aplicación del refuerzo. En las condiciones atmosféricas de aplicación, las resinas deben ser trabajables y con pot-life (tiempo de endurecimiento dentro del conjunto) compatibles con el formato de presentación del producto [1].

Los productos planteados como alternativas a los adhesivos epoxi son [1].

- adhesivos de poliéster, de rápido fraguado, aunque presentan eventuales problemas de retracción, alto coeficiente de expansión térmico, sensibilidad a medios alcalinos y mala adherencia sobre poliéster endurecido.
- adhesivos de viniléster, con problemas de retracción y afectados en gran medida por el contenido de humedad de la superficie.

Resina	Densidad [Kg/m³]	Resistencia a la Tracción [MPa]	Módulo de Elasticidad [MPa]	Elongación en rotura [%]	Temperatura Máxima [°C]
Poliéster	1,2	50 – 65	3,00	2 – 3	120
Viniléster	1,15	70 – 80	3,50	4 – 6	140
Epoxi	1,1 – 1,4	50 – 90	3,00	2 – 8	120

Tabla 2.5: Comparación de propiedades de resinas según su naturaleza [1].

La selección del tipo de resina debe tener en cuenta el rango de temperaturas durante la aplicación y cuando la estructura este en servicio. Merece especial atención el punto de transición vítrea de la resina, a partir del cual el producto empieza a perder propiedades mecánicas, con mayores deformaciones y menor rigidez. En general esta temperatura depende de la temperatura de curado, y se sitúa entre 60-82°C [1].

Adicionalmente a los criterios de resistencia estructural, debe prestarse especial atención a la producción de gases tóxicos durante la combustión, exigiendo a los

fabricantes valores límites, propios de cada material. A continuación se muestran de forma detallada las propiedades mecánicas y físicas de las resinas epoxi, comparándolas con el acero y el hormigón.

Propiedades	Adhesivo Epoxi endurecido	Hormigón	Acero
Densidad [Kg/m ³]	1100 - 1700	2350	7800
Módulo Elástico [GPa]	0,5 - 2	20 - 50	200
Módulo Cortante [GPa]	0,2 - 8	8 - 21	80
Coefficiente Poisson	0,3 - 0,4	0,2	0,3
Resistencia a Tracción [MPa]	9 - 30	1 - 4	200 - 600
Resistencia a Cortante [MPa]	10 - 30	2 - 5	200 - 600
Resistencia a la Compresión [MPa]	55 - 110	25 - 150	200 - 600
Elongación en Rotura [%]	0,5 - 5	0,015	25
Energía de Fractura [Jm ⁻²]	200 - 1000	100	105 - 106
Coefficiente Expansión Térmica	25 - 100	11 - 13	10 - 15
Absorción agua	0,1 - 3	5	0
T° Transición Vítreá	60 - 80	-	-

Tabla 2.6: Propiedades generales de las resinas epoxi [1].

2.2.2 Descripción de las fibras

En esta parte se dará una breve descripción de las características que aportan al conjunto del material compuesto las fibras empleadas en el refuerzo de estructuras.

Son tres los tipos de fibras sintéticas que, fundamentalmente, se utilizan para reforzar polímeros:

- Fibras de Carbono
- Fibras de Vidrio
- Fibras Orgánicas

El vidrio es una de las fibras más extendidas para el refuerzo plástico en términos generales, debido en gran parte a que resulta la más económica. Las fibras de carbono y de aramida son muy consistentes, tienen alta resistencia a tracción, alto módulo de elasticidad y baja densidad, por lo que tienen múltiples aplicaciones en el ámbito de la ingeniería y construcción a pesar de su precio mayor. A continuación se hace una breve reseña de las fibras de carbono:

Fibras de Carbono

Las fibras de carbono para materiales compuestos provienen principalmente del poliacrilonitrilo (PAN), que es un polímero de tipo acrílico. La estructura atómica de la fibra de carbono es similar a la del grafito, consiste en láminas de átomos de carbono ordenados en un patrón regular hexagonal. La diferencia está en la manera en que esas hojas se entrecruzan. El grafito es un material cristalino en donde las hojas se sitúan paralelamente unas a otras de manera regular. Las uniones químicas entre las hojas son relativamente débiles, lo que proporciona al grafito su blandura y brillo característicos. La fibra de carbono es un material amorfo: las láminas de átomos de carbono se colocan al azar, apretadas o juntas. Esta integración de las láminas de carbono es responsable de su alta resistencia. Las fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo de elasticidad tienen un diámetro de 5 a 8 μm [7].

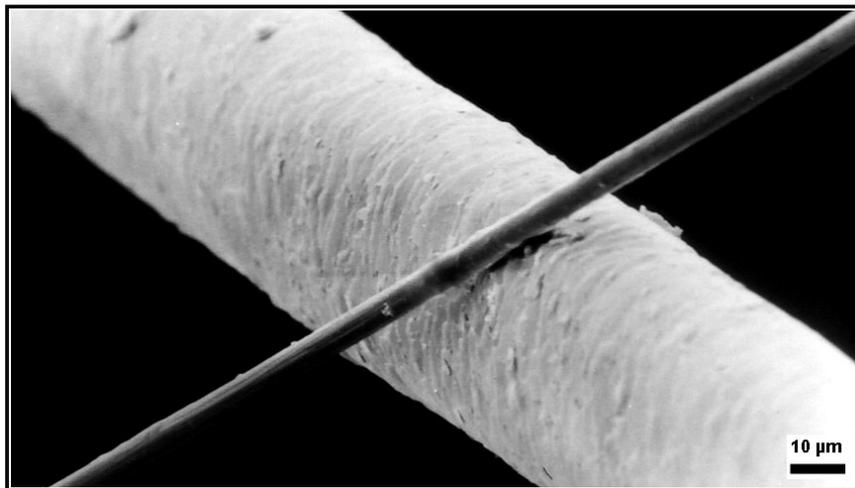


Figura 2.7: Un filamento de carbono de 6 μm de diámetro (más chico), comparado con un cabello humano (más grande) [6].

Las propiedades principales de este material compuesto son [7].

- Muy elevada resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado.
- Baja densidad, en comparación con otros materiales, como por ejemplo el acero.
- Elevado precio de producción.
- Resistencia a agentes externos.
- Gran capacidad de aislamiento térmico.
- Resistencia a las variaciones de temperatura, conservando su forma, sólo si se utiliza matriz termoestable.

Las razones del elevado precio de los materiales realizados con fibra de carbono se deben a varios factores [7].

- El refuerzo, es decir la fibra, es un polímero sintético que requiere un caro y largo proceso de producción. Este proceso se realiza a alta temperatura, entre 1100 y 2500 °C en atmósfera de hidrógeno durante semanas o incluso meses dependiendo de la calidad que se desee obtener, ya que pueden realizarse procesos para mejorar algunas de sus características una vez que se ha obtenido la fibra.
- El uso de materiales termoestables dificulta el proceso de creación de la pieza final, ya que se requiere de un complejo utillaje especializado, como el horno autoclave.

Propiedades específicas

El factor más importante que ha conducido al rápido desarrollo de los materiales compuestos es sin duda la reducción de peso que puede conseguirse a partir del uso de fibras de baja densidad con un alto módulo elástico y resistencia. Las fibras de carbono son muy superiores a las fibras de vidrio en términos del módulo elástico específico. El módulo elástico de las fibras de aramida es significativamente mejor que el de las fibras de vidrio, pero inferiores al módulo elástico de las fibras de carbono. Por otro lado, las fibras de aramida tienen una resistencia a tracción específica ligeramente superior que las fibras de vidrio y a algunos tipos de fibras de carbono [7].

Estabilidad térmica

En ausencia de aire y de otras atmósferas oxidantes, las fibras de carbono poseen propiedades excepcionalmente buenas a altas temperaturas. La resistencia y el módulo elástico dependen de la temperatura final del tratamiento térmico. Las fibras de carbono mantienen sus propiedades a temperaturas por debajo de los 2000 °C. Para aplicaciones que incluyan matrices de polímeros esta propiedad no puede ser aprovechada porque la mayoría de las matrices pierden sus propiedades aproximadamente por encima de los 200 °C [7].

Resistencia a compresión

La resistencia y la rigidez a compresión axial son valores difíciles de medir y sólo pueden reflejarse a partir de las propiedades de los materiales compuestos fabricados con

dichas fibras. Se ha encontrado que la rigidez axial en compresión es aproximadamente la misma que en tracción para todas las fibras [7].

Flexibilidad y rotura de las fibras

Las curvas “tensión – deformación”, mostradas en la siguiente Figura 2.8 sugiere que todas las fibras rompen de manera frágil a tracción sin ninguna deformación plástica o fluencia. Las láminas de fibra de carbono y vidrio son frágiles y se rompen sin ninguna reducción de su sección transversal, en contraste con las láminas de fibras de aramida, las cuales rompen de manera dúctil, con un pronunciado estrechamiento local muy grande. La fractura de las láminas a menudo implica el deshilachado de las fibras.

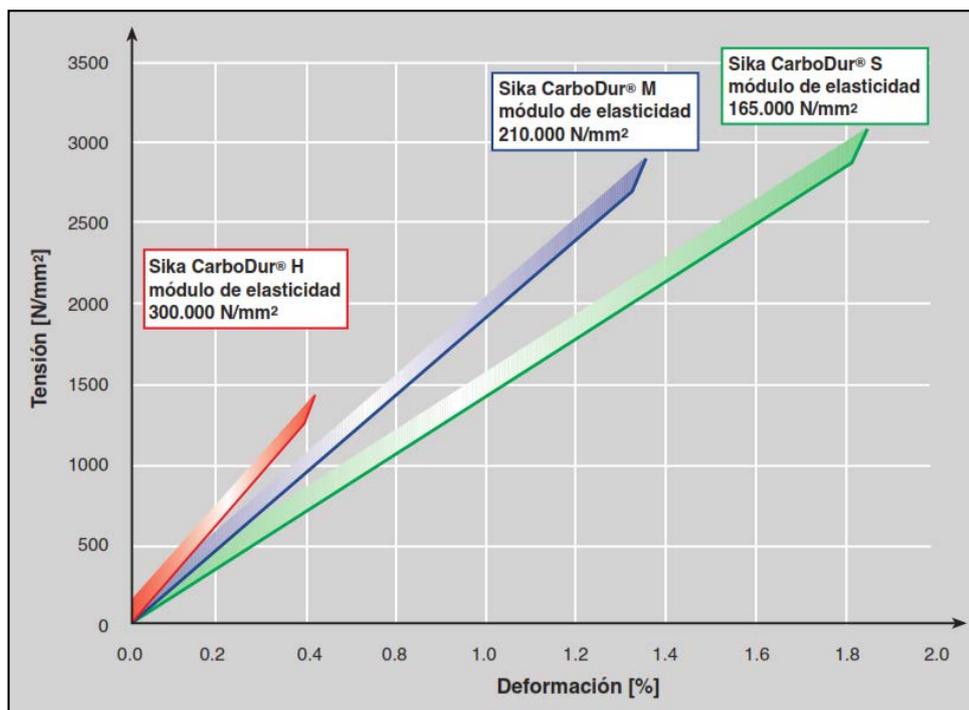
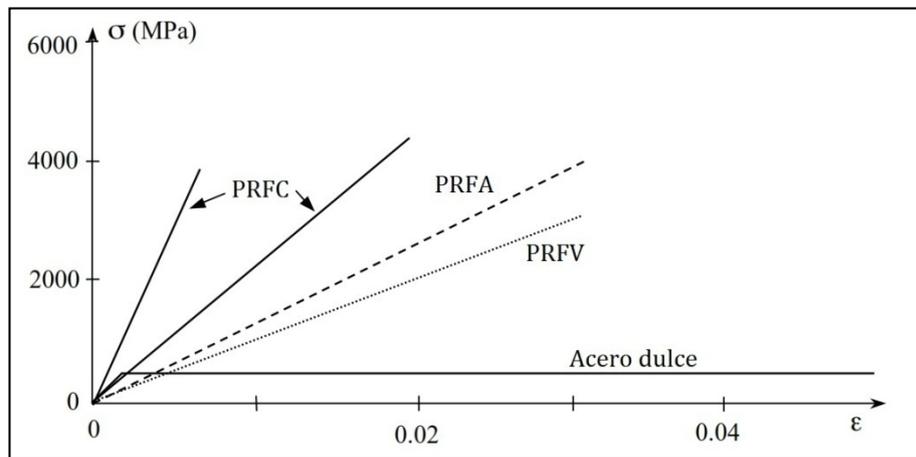


Figura 2.8: Diagramas tensión – deformación para diferentes PRF's y acero (arriba).

Diagramas tensión – deformación para diferentes productos de Sika [7].

En esta parte se ha desarrollado un conocimiento general de los materiales compuestos y sus componentes principales con vistas a su aplicación en la ingeniería y construcción como elementos de refuerzo de estructuras de hormigón armado. Existen muchos más datos en relación a ellos y una gran variedad de factores intervinientes en el sistema de refuerzo que se analizará más profundamente a continuación y en el que se intentará destacar a los materiales compuestos de fibra de carbono y resina epoxi como aquellos que presentan las mejores propiedades y unas prestaciones excelentes para el refuerzo mediante adhesión externa de estructuras de hormigón armado.

Fabricación del producto.

En la fabricación de los tejidos, los filamentos de fibra de carbono se ensamblan formando hebras sin torcer, usadas para crear una lámina unidireccional. Después de alineadas y estiradas, las fibras son introducidas en una prensa con una tela de fibras de vidrio impregnada en epoxi y con un plástico de protección. Estas fibras de vidrio sólo aportan rigidez transversal al conjunto para evitar el deshilachado durante fabricación y transporte. La misma operación se realiza pero colocando en dos direcciones perpendiculares las fibras de carbono para la fabricación de los tejidos bidireccionales [7].

El proceso de fabricación de los laminados compuestos de fibra de carbono y resina epoxi se denomina **pultrusión**. Éste es un proceso de fabricación con un costo competitivo debido a su alta automatización y a la gran variedad de formas que se pueden obtener; es un proceso continuo de perfiles con secciones constantes [7].

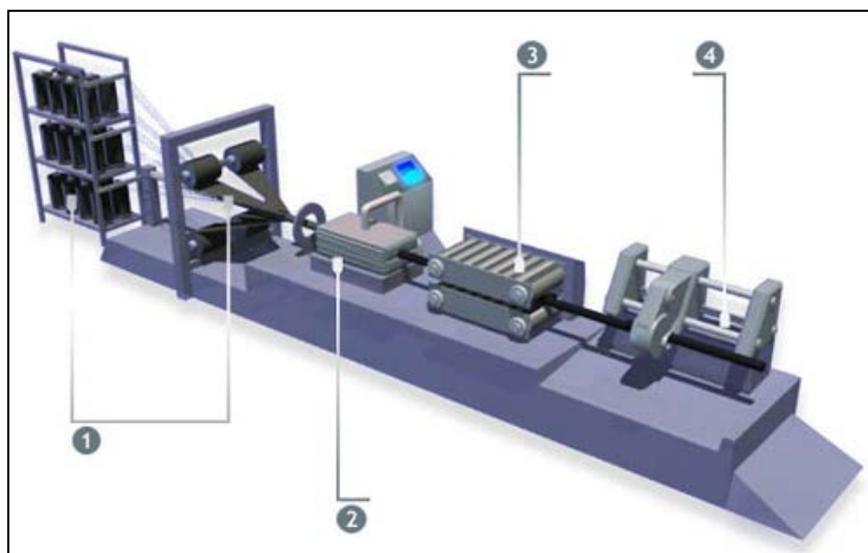


Figura 2.9: Esquema general del proceso de pultrusión [7].

El proceso comienza cuando se tira de las fibras de refuerzo, en forma de tejido, que están colocadas a modo de bobinas en estanterías al comienzo de la línea. El refuerzo se impregna de resina líquida al pasar a través de un baño o a través de una zona donde la resina se proyecta con inyectores (1). Las bandas de refuerzo impregnadas pasan a través de una zona de conformado donde son preformadas con la forma de la sección del molde. Una vez preformadas entran en el molde, que tiene la forma precisa de la sección que se pretende obtener, donde a través de un proceso térmico y de presión se hace polimerizar la resina termoestable a través de una reacción altamente exotérmica, obteniéndose la forma final de la pieza (2). Una vez que el perfil sale del molde se lo deja enfriar a temperatura ambiente, mediante una corriente forzada de aire o una corriente de agua, mientras un mecanismo simultáneamente engancha y tira del perfil (3). El perfil sale del mecanismo de tirado y es cortado automáticamente a la longitud requerida (4).

2.3 Sistema de Refuerzo

El sistema de refuerzo consiste en la adhesión externa sobre la superficie limpia de hormigón, de láminas de PRFC con prestaciones mecánicas sobresalientes, principalmente la resistencia a la tracción. De esta manera, este material compuesto actúa como una armadura externa, de manera muy similar a como lo hace una armadura convencional de acero.

Las propiedades mecánicas básicas de los materiales compuestos deben ser estimadas en base a las propiedades de los materiales constituyentes, fibra y matriz, y su fracción en el volumen del compuesto, que debe ser logrado con la aplicación de la “regla de mezclas” como se realiza a continuación [2]:

$$E_f = E_{fib} \cdot V_{fib} + E_m \cdot V_m$$

$$f_f \approx f_{fib} \cdot V_{fib} + f_m \cdot V_m$$

Donde;

E_f : Módulo de elasticidad del FRP en la dirección de las fibras.

E_{fib} : Módulo de elasticidad de las fibras.

E_m : Módulo de elasticidad de la matriz.

V_{fib} : Fracción de volumen de las fibras.

V_m : Fracción de volumen de la matriz.

f_f : Resistencia a tracción del FRP en la dirección de las fibras.

f_{fib} : Resistencia a tracción de las fibras.

f_m : Resistencia a tracción de la matriz.

Se puede apreciar en las ecuaciones anteriores que: $V_{fib} + V_m = 1$. Además, los valores típicos de volumen de fibras en laminados están en el orden de 0,50 – 0,70.

2.3.1 Situación del mercado actual

Existen en el mercado diferentes sistemas de presentación de refuerzos mediante adhesión externa de PRFC. Aunque la producción del material se lleva a cabo en Corea del Norte, país que posee un monopolio en la fabricación de los PRFC. Existen en otros países empresas que importan el material ya manufacturado de Corea y venden sus productos a clientes, como es el caso de Sika, una empresa suiza líder en brindar este tipo de soluciones y muchas más [12].

Los sistemas más comúnmente utilizados son dos: En primer lugar existe un sistema con materiales prefabricados, en particular láminas de PRFC; por otro lado, existe también un sistema para preparar y curar in situ tejidos de PRFC. A continuación, se dará una visión general de las diferentes formas de estos sistemas y más adelante se los volverá a detallar aunque aplicado a la parte de ejecución en obra [12].

2.3.2 Material prefabricado

El material compuesto viene en forma de laminados, cintas o bandas longitudinales curadas preconformados, en los que las fibras van como elemento resistente y una matriz de resina. Normalmente tienen un espesor de entre 1,2 y 1,4 mm y una anchura variable entre 50 y 200 mm. Se presentan en rollos de longitud entre 25 y 500 m que luego se cortan en obra a las dimensiones deseadas. En función de la sección de refuerzo que se requiera, los laminados también pueden colocarse en varias capas, adheridos entre ellos, hasta lograr la resistencia deseada.

Como adhesivo para unir los laminados al soporte se utiliza una resina epoxi. Normalmente debe ser un adhesivo de dos componentes (resina epoxi y un endurecedor)

de consistencia pastosa y alta tixotropía, para poderlo colocar en elementos horizontales y verticales sin problemas de descuelgue o despegue del soporte [7].

Las características más importantes que debe tener el adhesivo que se utilice para este fin son:

- Buenas resistencias a tracción y corte.
- Temperatura de transición vítrea elevada.
- Buena adherencia al hormigón y a los laminados.

En Argentina, Sika ofrece el sistema CarboDur® S512 de laminas de PRFC pultruidas, que se adhieren externamente a la estructura mediante el adhesivo epoxi Sikadur® 30. Este sistema se utiliza para mejorar, aumentar o restituir la capacidad de carga y resistencia de las estructuras para [8]:

Aumentar la capacidad de carga:

- Incrementar la capacidad de carga en losas, vigas y secciones de puentes
- Para instalación de maquinaria pesada.
- Para estabilizar vibraciones en estructuras.
- Para cambios de uso en edificios.

Daños en elementos estructurales tales como:

- Deterioros en los materiales de construcción originales.
- Corrosión del acero de refuerzo
- Accidentes (Impacto de vehículos, sismos; incendio)

Mejora del servicio o durabilidad:

- Reducción de deflexiones o ancho de fisuras.
- Reducción de tensión en acero de refuerzos.
- Mejora de la resistencia a la fatiga.

Cambio del sistema estructural:

- Remoción de paredes y/o columnas.
- Remoción de secciones de pisos y paredes para crear accesos o aberturas.

Resistencia a posibles eventos:

- Aumento de resistencia a sismos, impacto o explosión, etc.

Para reparar defectos de diseño o construcción tales como:

- Refuerzo insuficiente o inadecuado.

Las características y ventajas que posee este sistema son [8]:

- Exento de corrosión
- Muy altas resistencias.
- Excelente durabilidad y resistencia a fatiga.
- Longitud ilimitada, no se requieren uniones.
- Sistema de bajo espesor, simple ejecución de intersecciones y cruces.
- Fácil transporte (rollos).
- Liviano, fácil de instalar, especialmente sobre cabeza (no se requiere soporte temporario ni apuntalamiento)
- Mínima preparación de láminas, aplicable en varias capas.
- Bordes lisos, sin fibras expuestas como resultado de la fabricación por pultrusión.
- Ensayadas y homologadas exhaustivamente en distintos lugares del mundo.



Figura 2.10: Aplicación de láminas Sika® CarboDur® [8].

A continuación se detallan los datos del producto:

- Ancho: 50 mm (variable, corresponde al número 5 de la denominación del producto).
- Espesor: 1,2 mm (corresponde al número 12 de la denominación del producto).
- Sección: 60 mm².
- Densidad: 1,6 g/cm³.
- Contenido de fibra en volumen: >68%.
- Modulo E medio, en sentido longitudinal a la fibra: 165.000 MPa.

Refuerzo Estructural de Elementos de Hormigón con Fibras de Carbono (PRFC).

- Resistencia a la tracción medio, en sentido longitudinal a la fibra: 3.100 MPa.
- Elongación en rotura, valor mínimo: >1,70%
- Consumo típico de Sikadur® 30, para un ancho de 50 mm: 0,25 a 0,35 kg/ml.
- Resistencia mínima recomendada a pull-off del hormigón luego de la preparación de la superficie: 2,00 MPa.



Figura 2.11: Láminas Sika® CarboDur® aplicada en forma de L [8].

Esta forma es adecuada para hacer refuerzos a esfuerzo cortante, a modo de estribos externos. Estos laminados se presentan en piezas de longitudes adecuadas para adaptarse a las dimensiones más habituales de las vigas (entre 30 cm y 100 cm para cada uno de los brazos).

Como se menciono anteriormente, para pegar estas laminas a la estructura se utiliza el adhesivo epoxi Sikadur® 30, que está basado en una combinación de resinas epoxis y filler especial, diseñado para uso a temperaturas normales entre +8 °C y +35 °C [10].

Las características y ventajas que posee este adhesivo son [10]:

- Fácil de mezclar y aplicar
- No requiere imprimante
- Alta resistencia a la deformación bajo carga permanente

Refuerzo Estructural de Elementos de Hormigón con Fibras de Carbono (PRFC).

- Muy buena adherencia al hormigón, albañilería, piedra, acero, hierro fundido, aluminio, madera y láminas de acero Sika® Carbodur®.
- Su endurecimiento no es afectado por la alta humedad.
- Elevada resistencia adhesiva.
- Tixotrópico: no escurre en aplicaciones verticales o sobre cabeza.
- Libre de solventes.
- Endurece sin retracción.
- Diferente color de ambos componentes (para control de mezclado).
- Elevada resistencia mecánica inicial y final.
- Altas resistencias a la abrasión y al impacto.
- Impermeable a líquidos y vapor de agua.

Algunas características de este adhesivo son [10]:

- Posee dos partes, una blanca y una negra, la mezcla es color gris.
- Es una resina epoxi, de densidad 1,65 kg/l.
- Espesor máximo por capa: 30 mm.
- Retracción: 0,04%.
- Coeficiente de expansión térmica: $9 \cdot 10^{-5}$.
- A mayor temperatura ambiente, mayor resistencia mecánica.



Figura 2.12: Pegamento epoxi Sikadur® 30 [10].

2.3.2 Materiales de tejidos de fibras

Los tejidos a base de fibra son materiales en los que no se ha colocado todavía la matriz de resina. Suelen tener entre el 95 y el 98% de las fibras en dirección longitudinal y entre el 2% y el 5% restante en la dirección transversal, para efectuar el cosido e impedir el deshilachado de los longitudinales [7].



Figura 2.13: Tejido SikaWrap® [9].

De la misma forma que en los laminados, el tejido de fibra de carbono puede colocarse en varias capas, hasta conseguir el valor de resistencia deseado en el cálculo.

Los tejidos suelen tener un espesor de entre 0,13 y 0,30 mm, con gramaje de entre 200 y 800 g/m³. Se suelen presentar con anchos de entre 30 y 60 cm, en rollos de entre 40 y 100 m, que posteriormente se cortan en obra a las dimensiones deseadas.

Para adherir los tejidos al soporte de hormigón se suelen utilizar resinas epoxi fluidas. Esa fluidez permite a la resina penetrar entre las fibras del tejido, impregnarlas, mojarlas y formar el material compuesto.

Los tejidos pueden presentarse del tipo unidireccionales o pluridireccionales que pueden ser impregnados a pie de obra con el “sistema en húmedo”, o en el lugar de colocación mediante el “sistema en seco” [12].



Figura 2.14: Refuerzo de una columna con el sistema SikaWrap® Hex [9].

En Argentina, Sika ofrece el sistema SikaWrap® Hex 103 C de tejidos de fibras de carbono unidireccionales, que se saturan en obra con la resina epoxídica Sikadur® -300 para conformar sistemas de polímeros reforzados con fibras de carbono y utilizarlos para el refuerzo de elementos estructurales. Este sistema es especialmente apto para el refuerzo a flexión, corte y compresión de elementos estructurales de hormigón armado y pretensado tales como vigas, columnas o muros en edificios, puentes, túneles, tanques, estacionamientos, muelles, plantas industriales, de agua, de energía, etc. por las siguientes causas [9]:

- Incremento de cargas.
- Incremento de carga viva en depósitos.
- Incremento de volumen de tráfico en puentes.
- Instalación de maquinaria pesada en edificios industriales.
- Estructuras sometidas a tensiones cíclicas (vibración).
- Cambios en el uso del edificio.
- Refuerzo sísmico.
- Envoltura de columnas y vigas. Aumento de ductilidad.
- Paredes de mampostería no reforzada.
- Cambio en el sistema estructural
- Supresión de muros o columnas.
- Remoción de secciones de losa y muros para aperturas.

- Defectos de diseño o construcción.
- Cuantía de acero insuficiente.
- Sección de hormigón insuficiente.

Las principales ventajas que posee este sistema son:

- Son flexibles, pueden colocarse envolviendo elementos de formas complejas.
- Poseen alta resistencia.
- Su peso es muy bajo.
- No se corroen.
- De bajo impacto estético.
- Se entregan listos para colocar.
- Pueden ser recubiertos con revestimientos.

A continuación se presentan los datos del producto:

- Tipo: SikaWrap®.
- Ancho: 0,63 m.
- Largo: 15,30 m.
- Espesor: 1,00 mm.
- Sección: 630 mm².
- Densidad: 2,25 g/cm³.
- Contenido de fibra en volumen: >68%.
- Modulo de elasticidad de las fibras: 234.500 MPa.
- Resistencia a la tracción de las fibras: 3.450 MPa.
- Elongación en rotura de las fibras, valor mínimo: >1,5%
- Modulo de elasticidad de las láminas curadas: 73.100 MPa.
- Resistencia a la tracción de las láminas curadas: 960 MPa.
- Elongación en rotura de las láminas curadas, valor mínimo: >1,33%

Detalles de aplicación:

Preparación de la superficie:

- La superficie debe estar limpia y sana. Debe estar seca (contenido de humedad < 4%).
Remover polvo, grasas, compuestos curadores, impregnaciones, pinturas, revoques,

partículas extrañas, material suelto o cualquier otro elemento que impida la correcta adherencia.

- Cuando la superficie sea irregular debe ser nivelada con un mortero de reparación adecuado (Sikadur®-31, Sikadur®-41). La resistencia de adherencia del hormigón debería ser verificada después de la reparación de superficie por un ensayo aleatorio de resistencia de adherencia (ACI 503R) a criterio del calculista. La mínima resistencia de adherencia debe ser de 15 kg/cm² con falla del hormigón.

- Para la preparación de la superficie de hormigón se recomienda utilizar chorro de arena o cualquier otro procedimiento de limpieza mecánica adecuada. Antes de la colocación del tejido, la superficie de hormigón debe ser imprimada y sellada usando el adhesivo epoxi Sikadur - 300. El material puede ser aplicado por aspersión, brocha o rodillo.

- SikaWrap® debe ser cortado previamente a la longitud apropiada usando tijeras de tipo industrial o para trabajo pesado. Debe evitarse el uso de cualquier elemento de corte sin filo que pueda debilitar o deshilar la fibra.

- SikaWrap® debe ser saturado o impregnado en forma manual o mecánica utilizando Sikadur® -300 y se colocará realizando solapes de al menos 15 cm. inmediatamente después de impregnado el sustrato entre 30 minutos y 60 minutos después de imprimada la superficie de hormigón.

- Luego de la colocación se procederá al sellado final del tejido con Sikadur® -300 (con rodillo).

El consumo de la resina epoxídica Sikadur® -300, depende de la rugosidad de la superficie y la práctica que se tenga en el procedimiento de impregnación del tejido, sin embargo el consumo teórico aproximado es de 1 kg/m² de producto para la imprimación del sustrato y para la saturación o impregnación del tejido.

2.3.3 Acotaciones finales

El parámetro principal que define las características de un refuerzo de PRFC no es la resistencia a la tracción, que resulta siempre mucho mayor que la resistencia de trabajo a las que están sujetos los PRFC, sino el módulo elástico. Cuanto más elevado es el módulo elástico de las fibras, más alta es la contribución a la rigidez que estas podrán ofrecer [7].

Las fibras más adecuadas para ser utilizadas en la restauración de estructuras de hormigón armado son las fibras de carbono de resistencia media (carga de rotura a tracción > 2000 MPa) y módulo de elasticidad medio-alto ($E = 165-250$ GPa), el cual es un módulo de elasticidad más alto que las fibras de vidrio y aramida y es compatible con la deformación del hormigón armado. Para la restauración de los edificios de albañilería y estructuras de madera, que se caracterizan por tener un módulo elástico más bajo, es, en cambio, más conveniente recurrir al uso de compuestos fibrosos caracterizados por un módulo de elasticidad más bajo que el del carbono. En este caso, es mejor recurrir al uso de compuestos a base de fibras de vidrio, caracterizadas por un módulo elástico inferior a los 80 GPa y, por lo tanto, más compatibles desde el punto de vista elasto- mecánico con las superficies [7].

En lo relativo a la matriz polimérica, las resinas epoxídicas son preferibles a las de poliéster y vinilester, sobre todo por su mayor capacidad de adhesión a la superficie cementicia y por ser la resina más compatible con las fibras de carbono. Es la que mejor moja las fibras y la que más adherencia tiene a ellas. Además tiene un curado sin retracción, lo cual es muy importante para el uso al que va destinado, siendo un problema en las resinas de poliéster y vinilester [7].

A continuación se dará una breve reseña de los ensayos que se pueden realizar a los materiales compuestos, en particular a los PRFC, para caracterizarlos y determinar sus propiedades a modo de utilizar valores reales obtenidos en laboratorio para el cálculo estructural.

Capítulo 3

ENSAYOS Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS

3.1 Introducción

Para el cálculo y diseño de estructuras reforzadas con materiales compuestos, es necesario disponer de datos experimentales fiables para caracterizar al material adecuadamente. Esto se puede hacer a escala micro-mecánica, macro-mecánica o estructural. Los objetivos principales de los ensayos en materiales compuestos son los siguientes [7]:

- Determinar las propiedades básicas de la lámina unidireccional para utilizarlas como datos de entrada en el cálculo y en el diseño estructural.
- Investigar y verificar los modelos mecánicos de comportamiento.
- Analizar el comportamiento del material y de estructuras reforzadas con materiales compuestos bajo condiciones de carga determinadas.

De acuerdo a estos tres objetivos, se pueden establecer los siguientes ensayos:

1. **Caracterización de los materiales constituyentes:** fibras, matrices e interface entre ambas, para su uso en un análisis micro-mecánico. Al conocer estas propiedades de antemano se puede predecir el comportamiento de la lámina individual y luego el de los laminados y estructuras.
2. **Caracterización de las propiedades de la lámina unidireccional simple** que forma la unidad básica de construcción de laminados de material compuesto.
- 3- **Determinación de las propiedades interlaminares**, es decir, de la interacción entre las láminas del material compuesto.
- 4- **Comportamiento del material bajo condiciones especiales de carga.** Por ejemplo, fatiga, deformaciones diferidas, impacto o explosiones.
- 5- **Análisis experimental del estado tensional y resistencia de estructuras** que presentan discontinuidades geométricas como bordes libres, agujeros, uniones, o transiciones súbitas.
- 6- **Evaluación de la integridad estructural** por medio de ensayos no destructivos.

En el caso de refuerzo y reparación de estructuras de hormigón armado, este esquema es igualmente válido. Los componentes a ensayar más habituales son la fibra de carbono y la resina epoxi que cumple la función tanto de matriz de la lámina de carbono

como de adhesivo entre el laminado y el elemento estructural. Por la propia naturaleza de los materiales compuestos, los métodos de ensayo empleados para su caracterización son mucho más complejos que los empleados para materiales isótropos, y no todos ellos están normalizados.

3.2 Caracterización de las Fibras

Las propiedades ensayadas más comunes son el módulo longitudinal, la resistencia a la tracción y el alargamiento en rotura. La norma ASTM D3822-96 [15] “Método de prueba estándar para las propiedades tensionales de una sola fibra” detalla estos ensayos. Por otro lado, la norma ASTM D3379-75 [14] describe el método de prueba estándar para la resistencia a la tracción y el módulo de Young para materiales de un filamento de alto módulo. Este método se recomienda para fibras con módulo elástico mayor de 21 GPa. El ensayo se realiza sobre una fibra individual o filamento, que se monta a lo largo del eje central de un papel troquelado que permite tensar y alinear la fibra sin dañarla (Fig. 3.1 a). Una vez que la probeta se monta en la máquina de ensayo, el papel se rasga para permitir la elongación de la fibra [32].

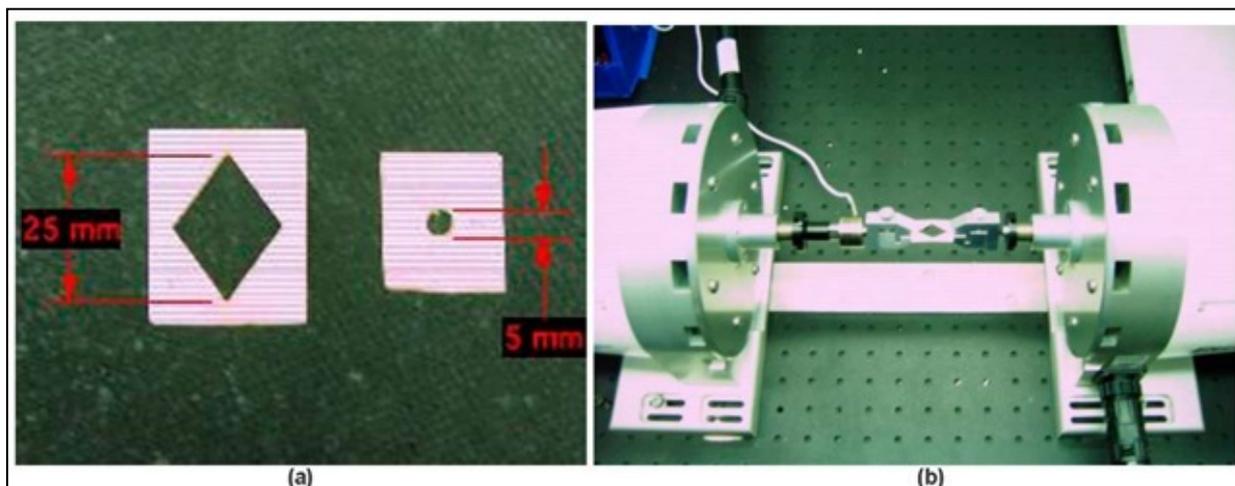


Figura 3.1: a) especímenes de 5 y 25 mm de largo; b) Máquina de prueba Bose con espécimen [32].

3.3 Caracterización de matrices y adhesivos

La resistencia y módulo de tracción así como la deformación de rotura pueden determinarse usando paneles planos o probetas. Los detalles de este método de ensayo se detallan en la Norma ASTM D638M-844 [16] para un panel grueso (de 1,0 a 10,0 mm) y ASTM D638-784 para un panel delgado (< 1,0 mm).

Debido a la gran dependencia entre la velocidad de deformación y la velocidad de carga, los resultados de los ensayos deben ser interpretados cuidadosamente. La deformación puede medirse mediante bandas extensométricas o extensómetros. Si se quiere obtener el coeficiente de Poisson, la deformación transversal puede medirse mediante una banda extensométrica (Fig. 3.2) colocada perpendicularmente a la dirección de la carga.

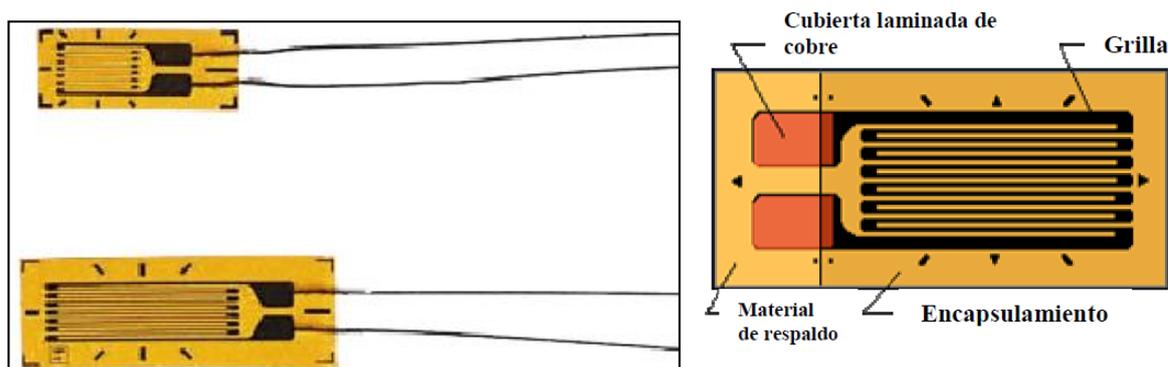


Figura 3.2: Detalle de una banda extensométrica.

3.4 Caracterización del material compuesto

3.4.1 Determinación de la densidad y volumen de fibras

Densidad

La densidad de un material compuesto puede determinarse obteniendo el peso de la probeta en seco y sumergida en agua. El peso de la probeta sumergida en agua puede determinarse sosteniéndola con un hilo y atada a una balanza. Los detalles de este ensayo se describen en la norma ASTM D3800-79 [17].

Porcentaje de volumen en fibra

- Método de la disolución en ácido:

El contenido en fibra de los materiales compuestos de matriz orgánica se suele determinar disolviendo la resina del material compuesto en un medio que no ataque la fibra. Una vez que la resina está completamente disuelta, el residuo (la fibra) se filtra, se limpia, se seca y luego se pesa. La elección del medio que disuelva la resina depende del tipo de matriz. Para las resinas epoxi, el medio más habitual es el ácido nítrico concentrado. La Norma ASTM D3171-76 [18] describe los detalles de este método de ensayo.

3.4.2 Propiedades mecánicas a tracción

Las propiedades mecánicas a tracción, como la resistencia a tracción, módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson de materiales compuestos laminados planos, se determinan por medio de ensayos estáticos a tracción de acuerdo a la norma ASTM 3039 [19]. La probeta a tracción es rectangular, con los laterales rectos, y de sección constante con pestañas unidas en sus extremos con un adhesivo. Para reducir las concentraciones de tensión en la zona de sujeción se utiliza un material compatible para las lengüetas finales.

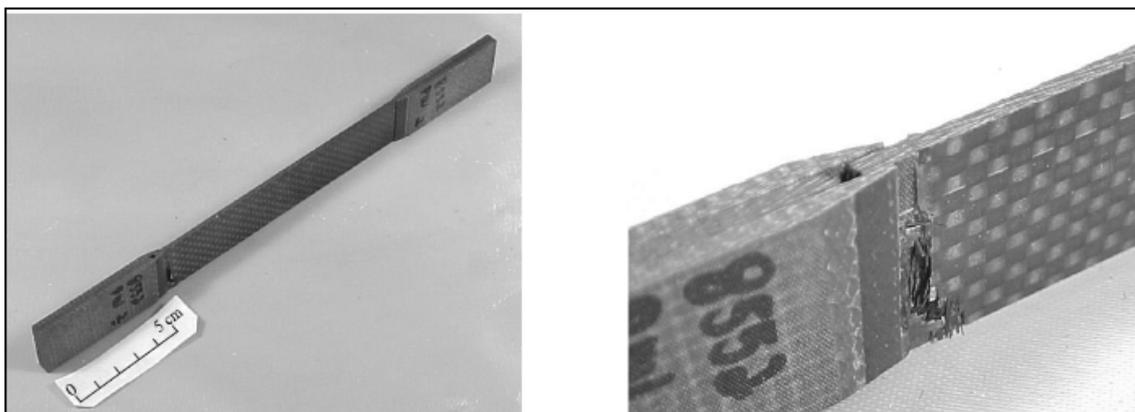


Figura 3.3: Espécimen luego de una prueba con su falla interior lateral en uno de sus extremos.

La muestra se sujeta a la máquina de ensayo por unas mordazas en cuña y es traccionada a una velocidad recomendada de 2 mm/min. Las deformaciones longitudinales y transversales se miden utilizando bandas extensométricas eléctricas de resistencia que son adheridas a la muestra. Se determinan la resistencia a tracción longitudinal y el máximo coeficiente de Poisson en el ensayo a tracción de laminados

unidireccionales. Por otro lado, la resistencia a tracción transversal y el mínimo coeficiente de Poisson se determinan en el ensayo a laminados unidireccionales a 90°.



Figura 3.4: Ensayo de tracción utilizando un extensómetro automático.

En los laminados de PRFC con las fibras dispuestas en la dirección principal de los esfuerzos de tracción, la curva de tensión - deformación es lineal hasta la falla. Estas muestras fallan por rotura a tracción de las fibras, que es seguida o acompañada por una abertura longitudinal paralela a las fibras, es decir, se despega la interface fibra-matriz.

3.4.3 Propiedades mecánicas a compresión

Las propiedades a compresión de los laminados son difíciles de medir debido al pandeo lateral de las probetas. Se han desarrollado numerosos métodos de ensayo y diseños de probetas para superar el problema del pandeo. Dos de ellos se detallan a continuación:

- Ensayo Celanese:

Esta fue la primera prueba estándar desarrollada para ensayar materiales compuestos reforzados con fibras a compresión. Sin embargo, debido a varias deficiencias que tiene este ensayo, no se considera un ensayo estándar. Utiliza una probeta de laterales

rectos con lengüetas adheridas en sus extremos y un agarre cónico tipo pinza a 10°. Una cubierta cilíndrica externa se utiliza para el montaje y la alineación.

Mientras se aplica la carga a compresión en los extremos de los manguitos cónicos, el agarre de la muestra se aprieta y la muestra es comprimida por fuerzas de fricción transmitidas a través de los extremos de las lengüetas. Se montan calibradores de tensión en la muestra para medir la deformación longitudinal y transversal.

- Ensayo IITRI:

Este ensayo fue el primero del Instituto de Investigación Tecnológica de Illinois y más tarde fue adoptado como el ensayo a compresión estándar de los materiales compuestos reforzados con fibras, cuyo procedimiento lo fija la norma ASTM 3410 [20]. Es similar al ensayo Celanese excepto por la utilización de mordazas en cuña plana en lugar de cónicas. Superficies en cuña plana proporcionan un mejor contacto entre la cuña y la pinza que las superficies cónicas y mejoran la alineación. También permite la variación en el espesor de las probetas. El accesorio del ensayo IITRI contiene dos espigas guías paralelas en su mitad inferior que se deslizan dentro de la mitad superior. La ayuda de estas guías proporciona una buena alineación lateral entre las dos mitades durante el ensayo.

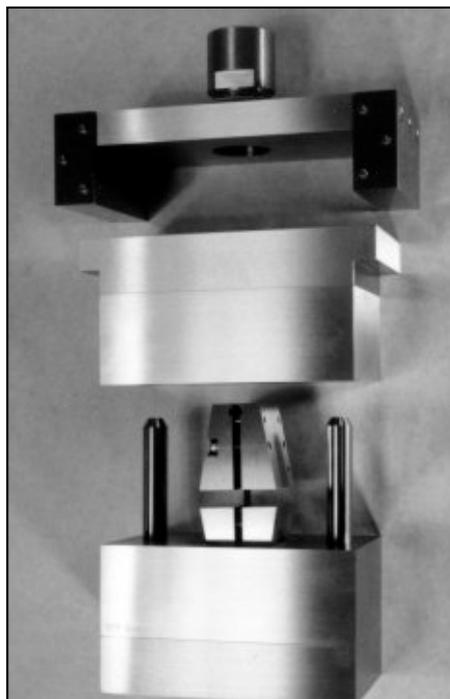


Figura 3.5: Máquina de ensayo IITRI desarmada.

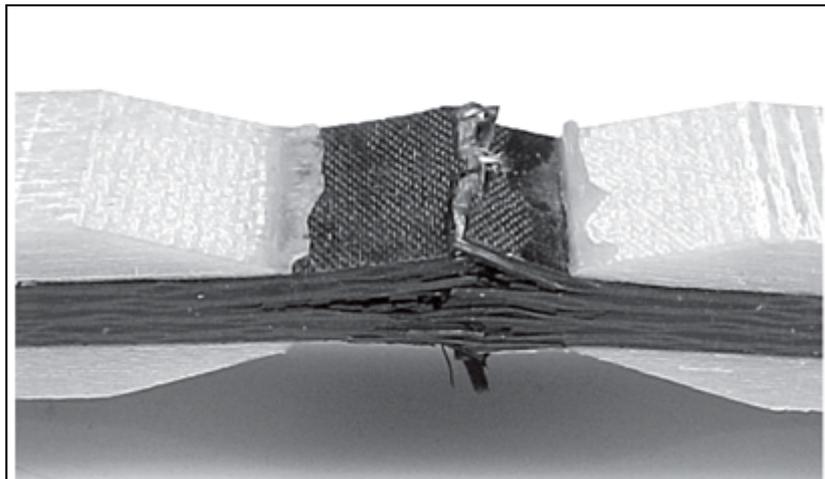


Figura 3.6: Espécimen luego de una prueba.

Para los laminados con las fibras orientadas en la dirección del esfuerzo, se pueden hacer las siguientes observaciones generales:

1. A diferencia de los metales dúctiles, la resistencia a tracción del laminado no es igual que la resistencia a compresión, aunque similar.
2. A diferencia de las curvas tensión-deformación a tracción, las curvas a compresión no son lineales.
3. La resistencia a compresión longitudinal en el laminado depende del tipo de fibra, fracción de fibras en el volumen, límite elástico de la matriz, relación de longitud, diámetro de las fibras y su alineación.
4. Las fibras de carbono tienen una resistencia a compresión y módulo de elasticidad ligeramente inferior que a tracción. Lo mismo pasa con las fibras de vidrio. No es el caso del Kevlar 49, donde la resistencia a compresión se reduce notablemente respecto de la tracción.

3.4.4 Propiedades mecánicas a flexión

Las propiedades mecánicas a flexión se determinan de acuerdo a la norma ASTM D790 [21]. En este ensayo, una viga de sección rectangular de material compuesto es sometida a flexión en tres puntos. Para la máxima tensión en la falla de la fibra en la cara traccionada de la probeta se determina la máxima resistencia a flexión del material.

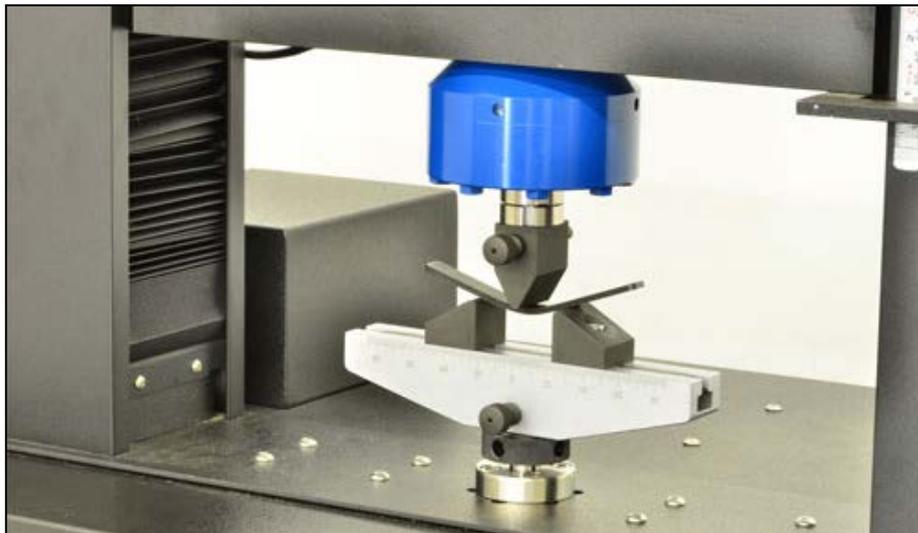


Figura 3.7: Ensayo a flexión de una probeta de PRFC.

Este ensayo ha recibido mucha aceptación en la industria de los materiales compuestos porque la preparación de la probeta y los accesorios necesarios son muy simples. Sin embargo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La tensión máxima de la fibra no siempre ocurre en la capa más externa del laminado.
2. En este ensayo, las tensiones normales son máxima en la mitad del tramo y las de corte son iguales en todo el tramo aunque cambian de signo en la mitad del tramo.
3. Debido a la gran deflexión, se desarrollan esfuerzos importantes en los apoyos. Esto afecta a las tensiones normales de flexión de la viga.
4. Aunque el valor de la resistencia a flexión está basado en la tensión máxima a tracción en la fibra externa, esto no refleja la resistencia a tracción real del material. Esta discrepancia crece debido a la diferencia en la distribución de tensiones bajo esfuerzos de flexión y de tracción. Las cargas flectoras crean una distribución no uniforme de tensiones a lo largo de la viga, sin embargo las cargas a tracción sí crean una distribución uniforme de tensiones. Cabe destacar que la resistencia a tracción determinada en el ensayo a flexión en tres puntos puede ser significativamente mayor que su resistencia a tracción.

3.4.5 Propiedades mecánicas a cortadura plana

Existen varios métodos de ensayo para determinar la resistencia a corte plano de los laminados. A continuación se detalla el método más común, el de la norma ASTM D3518 [23]:

- Ensayo a corte $\pm 45^\circ$:

Se trata del ensayo a tracción uniaxial de un laminado simétrico. Las dimensiones de la probeta, la preparación y el procedimiento de ensayo son los mismos que los detallados en el ensayo a tracción (ASTM 3039 [19]). Es importante destacar lo siguiente:

1. La relación tensión-deformación a corte en un material compuesto no es lineal.
2. A pesar de que los materiales con las todas fibras orientadas en la dirección del esfuerzo son los que tienen mayor resistencia a tracción y módulo elástico, sus propiedades a corte son peores.

3.4.6 Resistencia interlaminar a corte

La resistencia a corte interlaminar se refiere a la resistencia a corte paralela al plano de laminación. El ensayo se realiza en una viga de poca longitud de acuerdo con la ASTM D2344 [25]. Una probeta a flexión de una proporción entre longitud y profundidad (L/h) chica es ensayada a flexión en tres puntos para producir una falla a corte horizontal entre las láminas.

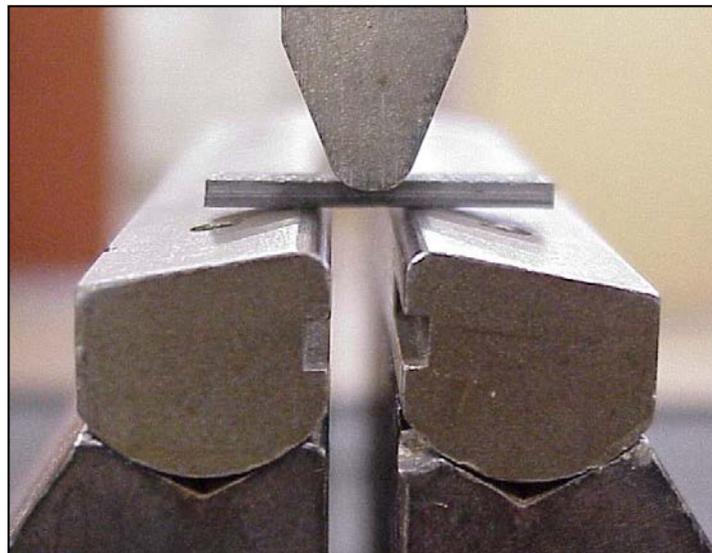


Figura 3.8: Ensayo a corte interlaminar según la norma ASTM D2344.

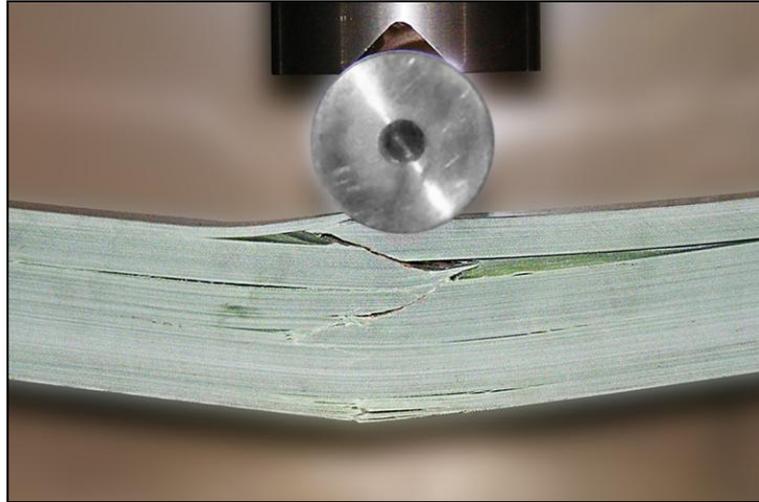


Figura 3.9: Detalle de la falla.

Del ensayo se puede apreciar que la tensión normal máxima en la viga decrece con la disminución de la relación L/h y la tensión máxima a corte en el eje neutro no es afectada por la relación L/h . De ahí que para relaciones L/h chicas, la tensión máxima a corte alcanzará la resistencia a cortante interlaminar a pesar de que la tensión normal máxima es todavía bastante baja. La viga fallará por corte interlaminar por la fisuración a lo largo del plano horizontal entre láminas. Las relaciones L/h recomendados para el ensayo oscila entre 4 y 5.

Capítulo 4

ENSAYOS SOBRE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

4.1 Introducción

Actualmente no existen ensayos normalizados para los sistemas de refuerzo con PRFC en hormigón, muros de ladrillos o madera. Si existen muchos informes sobre estudios individuales, realizados por distintas instituciones alrededor del mundo. En este capítulo se detallarán los más importantes, con los PRFC adheridos externamente sobre el hormigón, ya sea por la vía húmeda o seca, y por otro lado aplicado como refuerzo interno con el hormigón fresco o endurecido. Al final, se explicará en detalle el estudio realizado en mi pasantía de formación en la Universidad alemana “Ruhr Universität Bochum” sobre vigas de hormigón armado reforzadas con mallas de PRFC, con las respectivas conclusiones sobre el tema.

4.2 Tipos de falla

Las fibras de carbono no son un material dúctil y muestran una relación tensión - deformación prácticamente lineal cuando son cargadas hasta la rotura en tracción. Sin embargo, las secciones de hormigón armado con acero y reforzadas con PRFC muestran un comportamiento dúctil cuando son cargadas hasta la falla. Se puede observar que las curvas de momento - curvatura de vigas de hormigón armado reforzadas con PRFC son bilineales.

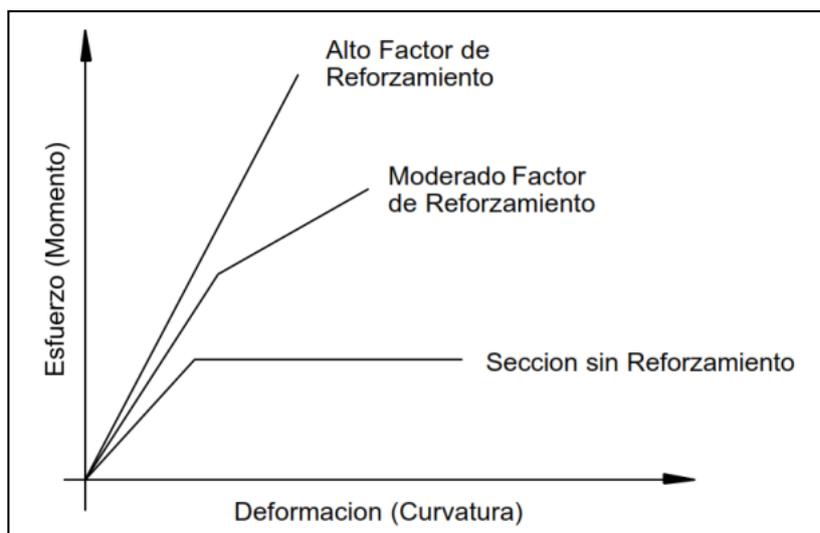


Figura 4.1: Relaciones de Momento-Curvatura para secciones de hormigón armado.

En las curvas se puede observar que lo siguiente:

- La primera parte de la curva presenta un ligero aumento en la pendiente con respecto a la curva que corresponde a la sección no reforzada.
- El punto de fluencia experimenta un aumento debido al refuerzo con las fibras.
- La parte de la curva comprendida entre la fluencia y la falla tiene una pendiente ascendente en vez de hacerse horizontal como es el caso de las curvas elastoplásticas.

La siguiente Figura 4.2 muestra la sección de una viga sometida a flexión que ha sido reforzada externamente con fibra de carbono en la zona en tracción y allí se pueden observar algunos de los distintos tipos de fallas posibles [33]:

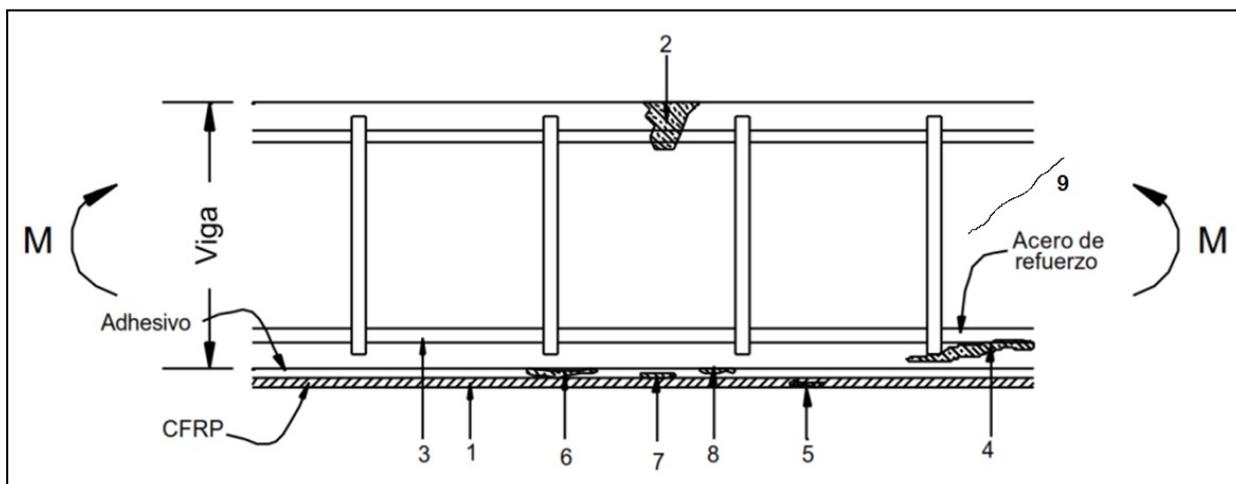


Figura 4.2: Tipos de falla de secciones reforzadas con PRFC [33].

1. **Falla de las fibras a tracción** cuando se alcanza la resistencia última del PRFC.
2. **Aplastamiento del hormigón** en la zona de compresión luego de que se alcance la deformación máxima en el hormigón ($\epsilon = 0,003$).
3. **Rotura del acero** cuando se alcanza la resistencia última.
4. **Desprendimiento del hormigón** en la zona a tracción debido a un desplazamiento vertical de la superficie inferior de la viga por irregularidades locales debidas a la insuficiente separación de la superficie y/o por desplazamientos relativos de las paredes de las fisuras por esfuerzos de corte.
5. **Rotura interlaminar**. Si se sobrepasa la resistencia al corte en la platina de PRFC esta falla a lo largo de las fibras y se da la rotura interlaminar.

6. **Falla del adhesivo** cuando los esfuerzos de corte en esta zona son muy grandes. También puede ser debido a la presencia de burbujas de aire en la pega luego de la colocación de la platina o tejido de PRFC.

7. **Falla en la superficie del PRFC** por mala adherencia entre el CFRP con el adhesivo o por una mala preparación de la superficie de PRFC.

8. **Falla en la superficie de hormigón.** Por la misma razón que antes y también por la deficiente preparación de la superficie de hormigón.

9. **Falla por corte** en los casos donde el refuerzo de corte sea insuficiente.

Si en los extremos la planchuela de refuerzo se encuentra convenientemente anclada, es muy probable que la resistencia última a flexión se alcance por aplastamiento del hormigón comprimido o cuando falla el refuerzo de PRFC (falla tipo 1 o 2). La rotura del PRFC ocurre por lo general después de la fluencia de las barras longitudinales de acero [34].

La falla por corte o tipo 9 es una rotura frágil, lo cual puede ser crítico en el caso del refuerzo a flexión. En estos casos, la capacidad de corte de la viga no reforzada determina su resistencia al corte, mientras que el refuerzo a flexión con PRFC proporciona una pequeña contribución a dicha resistencia [34].

La rotura por desprendimiento del recubrimiento de hormigón (falla tipo 4) se produce por concentración de tensiones cerca de los extremos de la placa de refuerzo. Una vez que la fisura se forma en el extremo final del refuerzo o cerca del mismo, se propaga hasta el nivel de la armadura de acero y luego progresa horizontalmente a lo largo de dicho refuerzo, provocando la separación del recubrimiento de hormigón [34].

En el tipo de falla 6 se produce el despegue entre el adhesivo y la viga. En general este modo de falla se produce debido a altas tensiones interfaciales normales y de corte cerca del extremo del refuerzo, que superan a la resistencia del elemento más débil, en la mayoría de los casos el hormigón. Luego de producido el despegue, generalmente una capa delgada de hormigón permanece adherida a la placa de PRFC. Esto sugiere que la falla ocurre en el hormigón adyacente a la interfaz hormigón-adhesivo [34].

El mecanismo de falla tipo 4 puede ser descrito de la siguiente manera: cuanto mayor es la fisura formada en el hormigón, las tensiones de tracción generadas por el hormigón fisurado se transfieren a la placa o lámina de PRFC. En consecuencia se

producen tensiones interfaciales locales muy altas entre el refuerzo y el hormigón en las cercanías de la fisura. Con el incremento de la carga aplicada, las tensiones de tracción en el refuerzo y las tensiones interfaciales entre el hormigón y aquél en las cercanías de la fisura también aumentan. Cuando estas tensiones alcanzan valores críticos, se empieza a despegar el refuerzo en la fisura y se propaga hacia uno de los extremos de la viga [34].

4.3 Ensayos a flexión sobre vigas reforzadas con PRFC

Para explicar este apartado se tomara de referencia un estudio realizado por la Escuela de Ingeniería de Azurem [26], en Portugal, en el cual estudian una serie de ensayos sobre vigas cargadas en 4 puntos con las dos técnicas de refuerzo existentes: la técnica de refuerzo externo mediante adhesivos epoxi (EBR), tanto por la vía húmeda como la seca, es decir con láminas y con tejidos de PRFC; y la técnica de refuerzo interno NSM (montado cerca de la superficie) tanto en hormigón endurecido con barras de PRFC como en estado fresco con mallas de una abertura considerable. En la técnica NSM el elemento estructural es calado para luego introducir las barras de PRFC en la abertura lograda. No requiere una preparación previa de la superficie de hormigón como si es el caso de las técnicas de refuerzo externo, y luego de hecha la hendidura en el hormigón, requiere de poco tiempo para la instalación del refuerzo en comparación con el otro método. También tiene la gran ventaja de que las probabilidades de daño por vandalismo o accidentes al refuerzo de PRFC son muy reducidas ya que no queda expuesto. Cuando se usa este método la apariencia del elemento estructural casi no se ve afectada por la intervención [1].

A continuación se compara la eficacia del sistema NSM en hormigón endurecido y el sistema EBR para técnicas de refuerzo de vigas sometidas a esfuerzos de flexión y corte. En este informe analizado, se llevaron a cabo dos grupos de ensayos a flexión en cuatro puntos, uno para las reforzadas a flexión y el otro para las de corte.

Para el refuerzo flexional se evalúa para las dos técnicas, la influencia de la relación de refuerzo longitudinal equivalente. Para la técnica NSM también se analiza la influencia de la distancia entre dos hendiduras adyacentes. Para evaluar la aplicabilidad del concepto de tensión efectiva propuesto por la ACI y FIB en el diseño de sistemas de fortalecimiento a flexión, se utilizó un procedimiento numérico estratégico. Los resultados

numéricos también se utilizaron para proponer un nuevo enfoque para la evaluación de la tensión efectiva en el contexto del diseño de refuerzo flexional con la técnica NSM [1].

Para el refuerzo de corte, se evaluó la influencia de la relación de refuerzo longitudinal de acero y el canto de la viga en la eficacia del fortalecimiento de ambas técnicas, NSM y EBR. En el proceso de refuerzo de corte se investigó también la influencia de la inclinación de los laminados de PRFC en la técnica NSM. El rendimiento de la formulación analítica se evalúa y se compara con la obtenida utilizando las propuestas de la ACI y FIB [26].

A continuación se muestran el esquema de las vigas ensayadas a flexión en cuatro puntos, con sus respectivos gráficos fuerza - deflexión, fotografías y las conclusiones a las que llegaron:

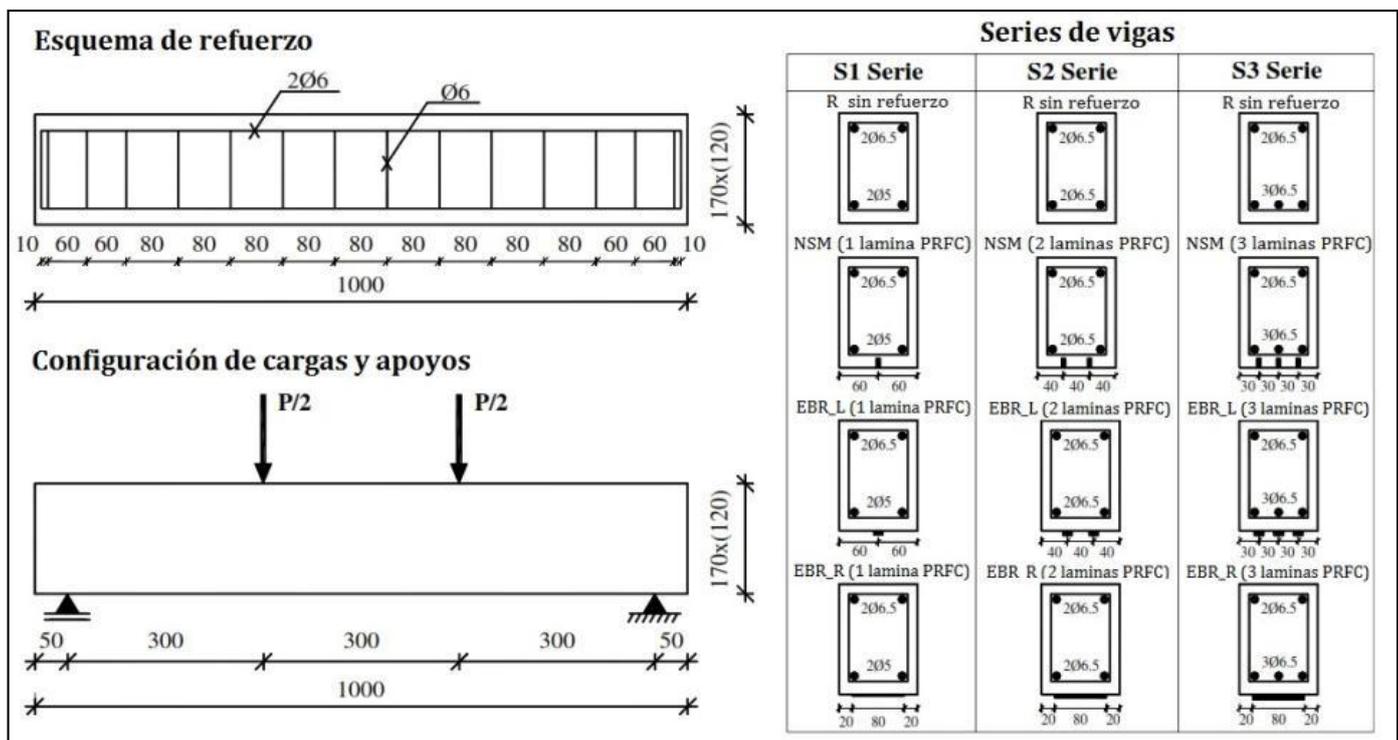


Figura 4.3: Series de vigas para refuerzo flexional (dimensiones en mm) [26].

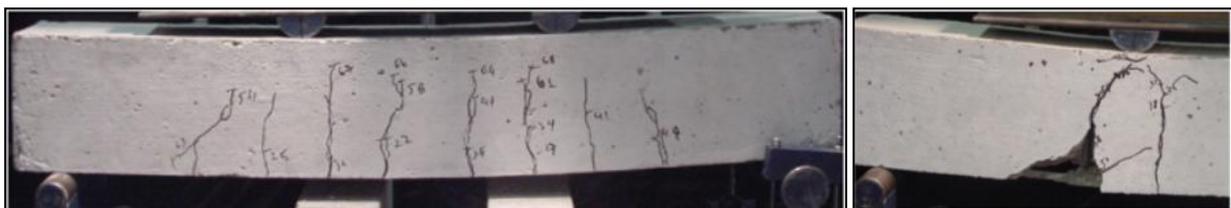


Figura 4.4: Viga de referencia sin refuerzo (izquierda) y viga NSM con una lámina (derecha) [26].



Figura 4.5: Viga NSM con dos o tres láminas (izquierda) y viga EBR con dos o tres láminas (derecha) [26].



Figura 4.6: Viga EBR con tres láminas (izquierda) y viga EBR con una capa de tejidos (derecha) [26].



Figura 4.7: Viga EBR con dos capas de tejidos (izquierda) y viga EBR con tres capas de tejidos (derecha) [26].

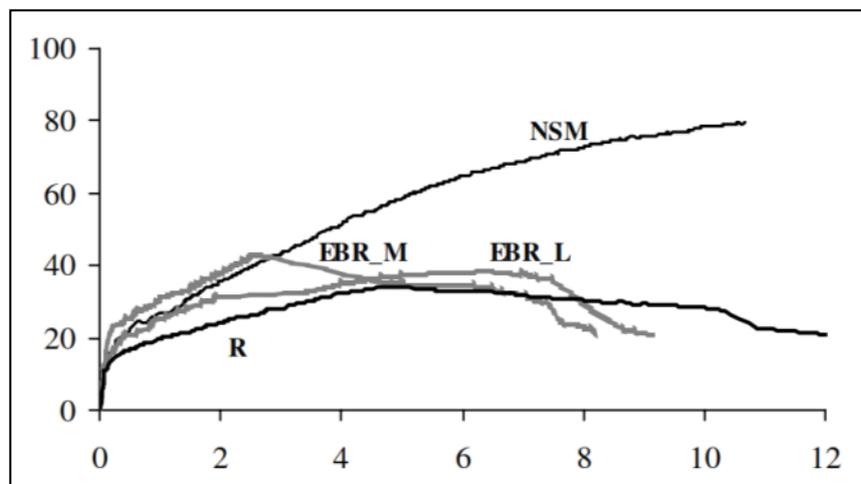


Figura 4.8: Diagramas fuerza – deflexión en punto medio, de la Serie 1 [26].

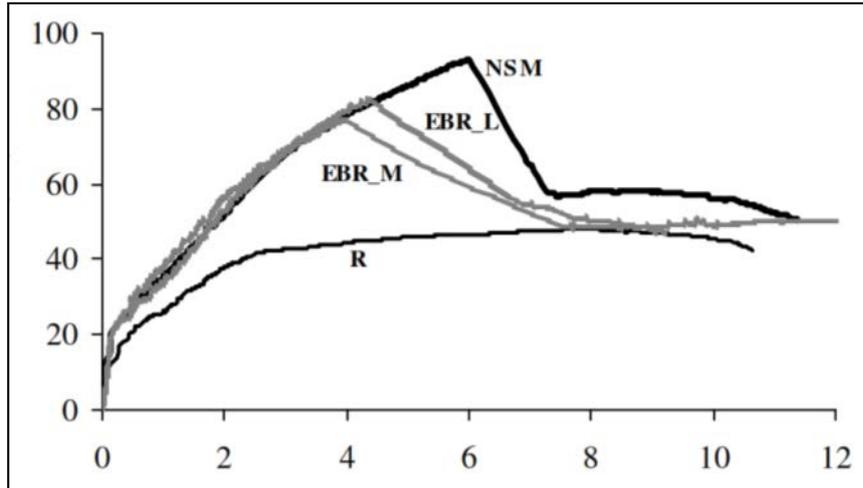


Figura 4.9: Diagramas fuerza - deflexión en punto medio, de la Serie 2 [26].

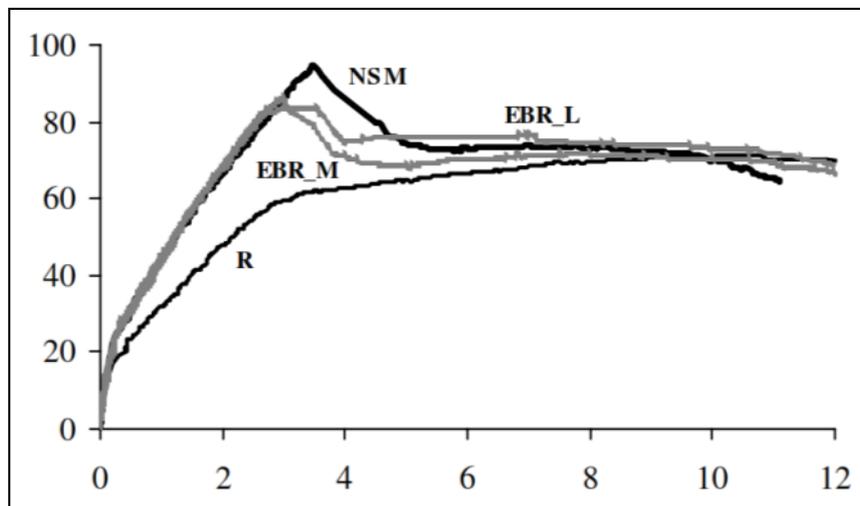


Figura 4.9: Diagramas fuerza - deflexión en punto medio, de la Serie 3 [26].

Conclusiones:

- Para el refuerzo a flexión, la técnica NSM fue la más efectiva, pero la diferencia entre la eficacia de la técnica NSM y EBR disminuyó con el aumento de la relación de refuerzo longitudinal equivalente $\rho_{l,eq}$ (acero y PRFC convertido a acero equivalente).
- En general, se predijeron contribuciones no seguras del sistema de PRFC, especialmente el enfoque de la ACI para la técnica EBR utilizando los tejidos de PRFC [26].

4.4 Ensayos de corte sobre vigas reforzadas con PRFC

Para aumentar la resistencia al corte de vigas de hormigón armado se pueden utilizar tres métodos de refuerzo: Se puede hacer una envoltura en forma de U de la viga, es decir en sus laterales y en su cara traccionada, o solo en sus laterales, o bien se puede hacer una envoltura completa con tejidos de PRFC en los casos que sea posible. También se puede reforzar con láminas de PRFC, tanto con el método EBR o el NSM [1].

Se debe tener en cuenta que los PRFC solamente tienen una alta resistencia en la dirección de las fibras, por lo tanto es conveniente orientarlas en la dirección de las tensiones principales de tracción para controlar adecuadamente las fisuras por corte [2].

Las fallas que se observan en este tipo de ensayos son principalmente tres: rotura del PRFC, falla por corte sin rotura del refuerzo y falla por corte debida al despegue del PRFC [2].

El primer tipo de falla es común que pase con una fisura de corte por tracción diagonal. La rotura del PRFC se propaga a lo largo de la fisura diagonal de corte en el hormigón, provocando la falla total de la viga de manera frágil. La falla por corte sin rotura del PRFC es esencialmente la misma que la anterior, excepto que el PRFC no se rompe y todavía puede soportar una carga luego de la falla del hormigón. En la falla por corte debido al despegue del PRFC, es notable como la viga falla rápidamente una vez que se empieza a despegar el material. La ductilidad de las vigas que rompen de esta forma es muy reducida [2].

De la misma prueba que en el punto anterior, se ensayaron también vigas para determinar el comportamiento de las mismas al corte. El ensayo se compuso de cuatro series de pruebas. La geometría, esquema de los refuerzos y apoyos se pueden apreciar en las siguientes figuras 4.10- 4.14. Luego se muestran los diagramas fuerza – deflexión en el punto central del tramo, y finalmente las conclusiones del ensayo [26].

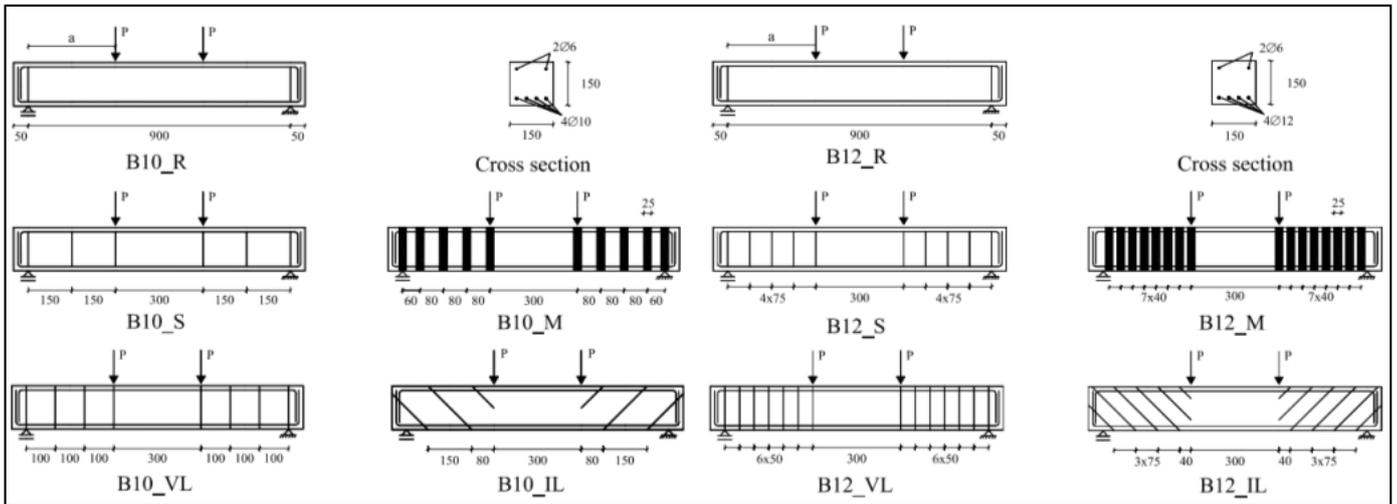
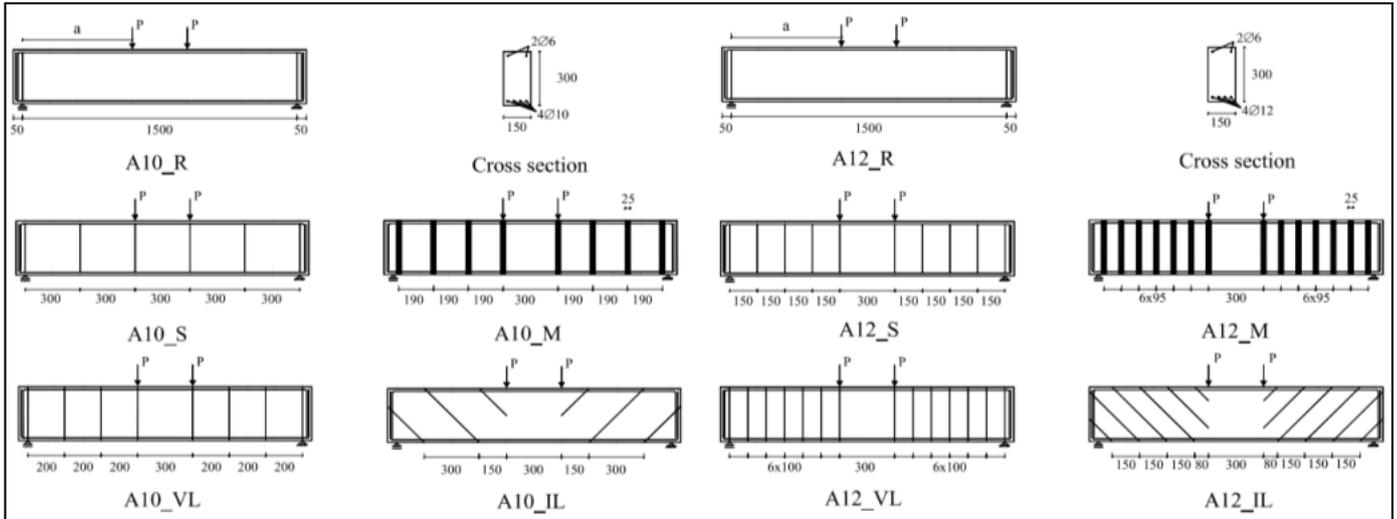


Figura 4.10: Esquemas de vigas para ensayos de corte [26].

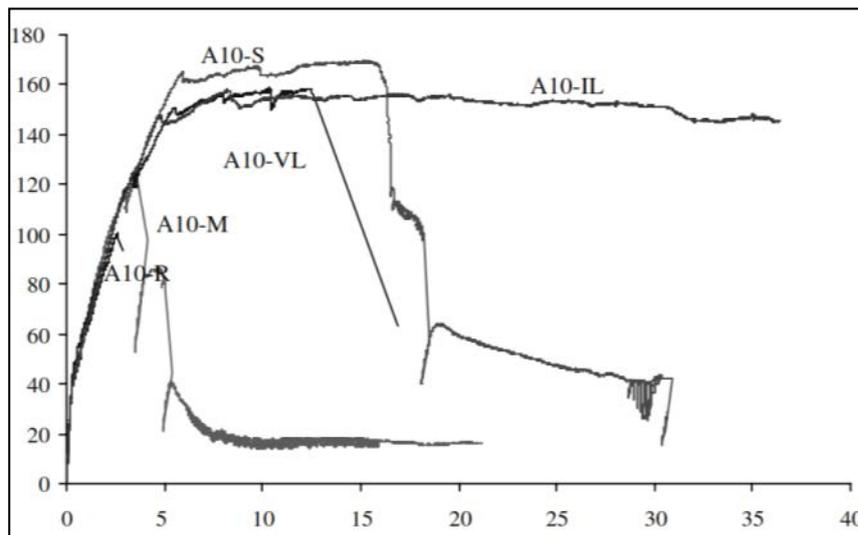


Figura 4.11: Diagrama fuerza – deflexión en el punto medio, de la serie A10 [26].

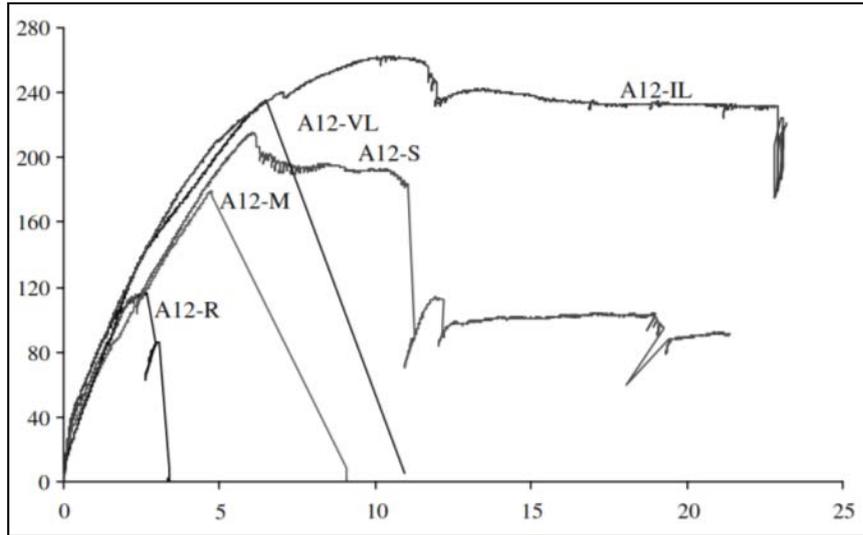


Figura 4.12: Diagrama fuerza - deflexión en el punto medio, de la serie A12 [26].

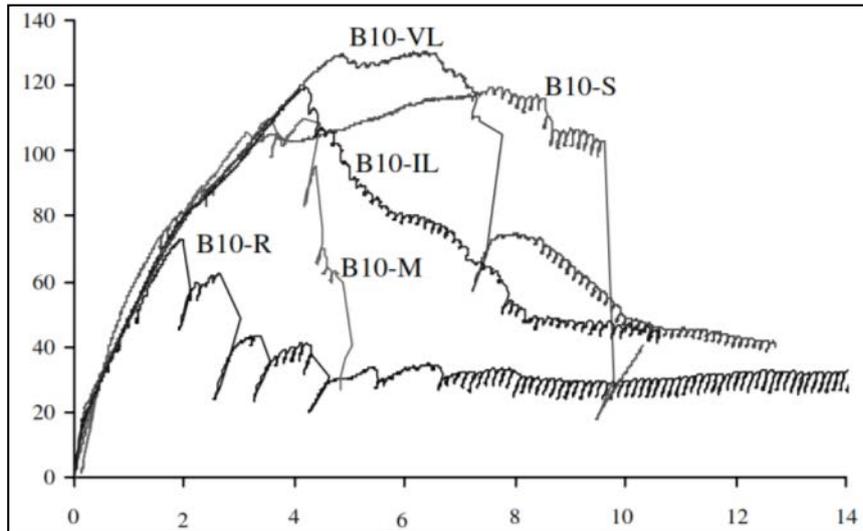


Figura 4.13: Diagrama fuerza - deflexión en el punto medio, de la serie B10 [26].

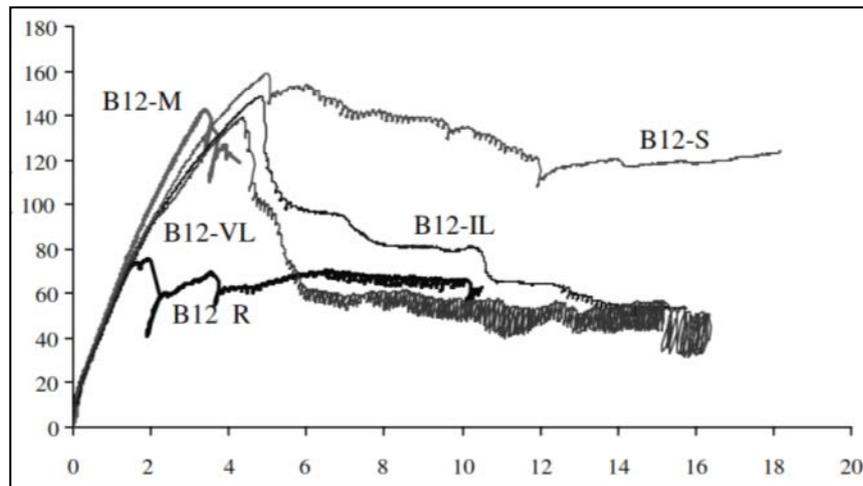


Figura 4.14: Diagrama fuerza - deflexión en el punto medio, de la serie B12 [26].

Conclusiones:

- Los sistemas de refuerzo a corte de PRFC aplicados en el presente trabajo incrementaron significativamente la resistencia al corte de las vigas de hormigón.
- La técnica de refuerzo NSM fue la más efectiva de los sistemas de PRFC. Esta eficiencia no fue solo en términos de la capacidad de carga de la viga, sino también en términos de la capacidad de deformación en el momento de la falla. En comparación con las vigas sin refuerzo de PRFC, las vigas reforzadas con las técnicas EBR y NSM presentaron un aumento promedio del 54% y 83% respectivamente.
- Aumentando la profundidad de la viga, los laminados a 45% resultaron más efectivas que los laminados verticales.
- La carga máxima de las vigas reforzadas a corte con barras de acero y con PRFC mediante la técnica NSM fue casi la misma.
- El tipo de falla de las vigas reforzadas mediante la técnica NSM no fue tan frágil como en las vigas reforzadas con la técnica EBR [26].

4.5 Ensayo sobre paneles de hormigón reforzados con fibras de carbono sometidos a cargas explosivas

El agregado de fibras de carbono al hormigón armado tradicional es también un método de mejorar la resistencia del hormigón al desprendimiento por una explosión en su superficie. La Universidad de Missouri en Estados Unidos estudió este tema y llevo a cabo una serie de pruebas para comparar la resistencia de los paneles construidos con hormigón armado tradicional y con hormigón armado reforzado con fibras de carbono largas [28]. Los primeros fueron probados como paneles de control. Se utilizaron sensores de presión en ambos lados de cada uno de los paneles. También, con un modelo de elementos finitos se replicaron los paneles para observar si se podía o no predecir el comportamiento de los mismos ante las pruebas realizadas. Cada uno de los paneles reforzados con fibras de carbono largas presento menores perdidas de material que los paneles de control. El agregado de estas fibras aumento significativamente la resistencia del hormigón a las cargas explosivas y se redujo significativamente el grado de fisuración

asociada con los paneles de hormigón. El modelo de elementos finitos fue una representación adecuada de las respuestas experimentales de todos los paneles. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para modelar una carga explosiva con un grado de seguridad aceptable.

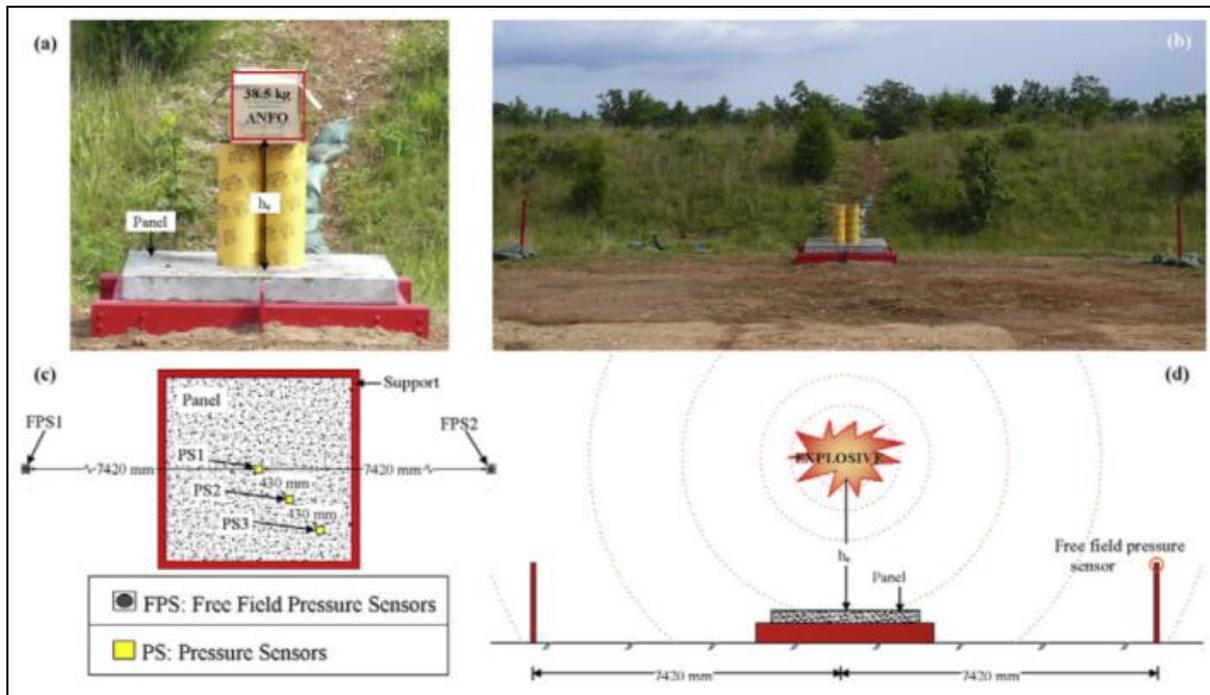


Figura 4.15: Instalación de la prueba y ubicación de los sensores [28].

El uso de fibras de carbono largas en una matriz de hormigón puede ser una opción económicamente viable para mejorar la resistencia a una carga explosiva con otras ventajas en comparación con otras posibles soluciones. Estas fibras reducen la fragmentación de hormigón al mejorar la resistencia al desprendimiento del hormigón, lo cual es una característica crítica del material para proteger al personal y equipos en el caso de una explosión, algo difícil de lograr con los materiales disponibles en el mercado. Mediante el uso de estas fibras, estas mejoras se producen sin modificar el diseño práctico, por lo tanto su implementación puede ser inmediata [28].

Se investigaron dos tipos de fibras de carbono largas: Una tipo A de 100 x 10 mm, 3K (3.000 filamentos por hebra) de tejido liso, fabricada con un 40% de epoxi pre impregnado. Dosificación 1,5% en volumen. La fibra tipo B es de 48K y tejido torcido de 100 mm de largo, con una matriz de polipropileno y una dosificación del 1% en volumen [28].

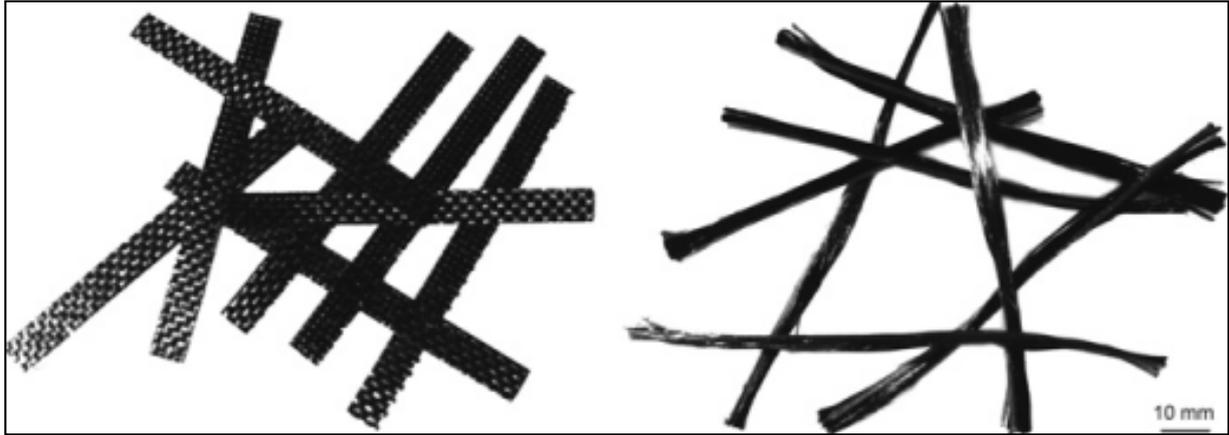


Figura 4.16: Fibras Tipo A (izquierda) y Tipo B (derecha) [28].

La carga de explosión utilizada fue de 34 kg de TNT y el detalle de armado de los paneles de control es el siguiente:

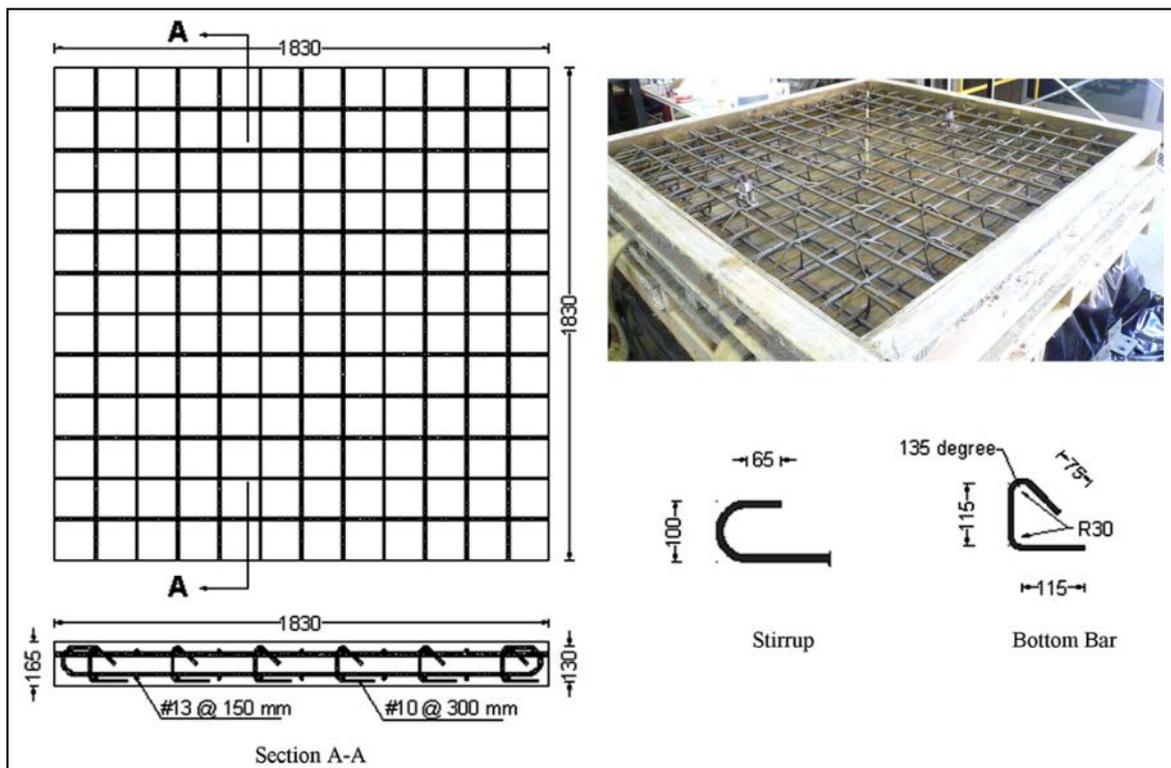


Figura 4.17: Geometría y detalle de armado de los paneles (unidades en mm) [28].

Se midió el peso de los paneles, tanto antes como después de la prueba explosiva, y se cuantificó el daño producido durante la explosión. En términos de cantidad de material perdido en la prueba, los paneles reforzados con fibras de carbono superaron a los paneles de control (hormigón armado sin fibras) en un factor de 10. Esta reducción de pérdida de peso tan significativa en los paneles con fibras se traduce en una disminución sustancial del peligro estructural en caso de explosiones [28].

A continuación se muestran los paneles una vez finalizadas las pruebas. Como se puede apreciar, es evidente la mejora que presentaron los paneles reforzados con fibras de carbono:

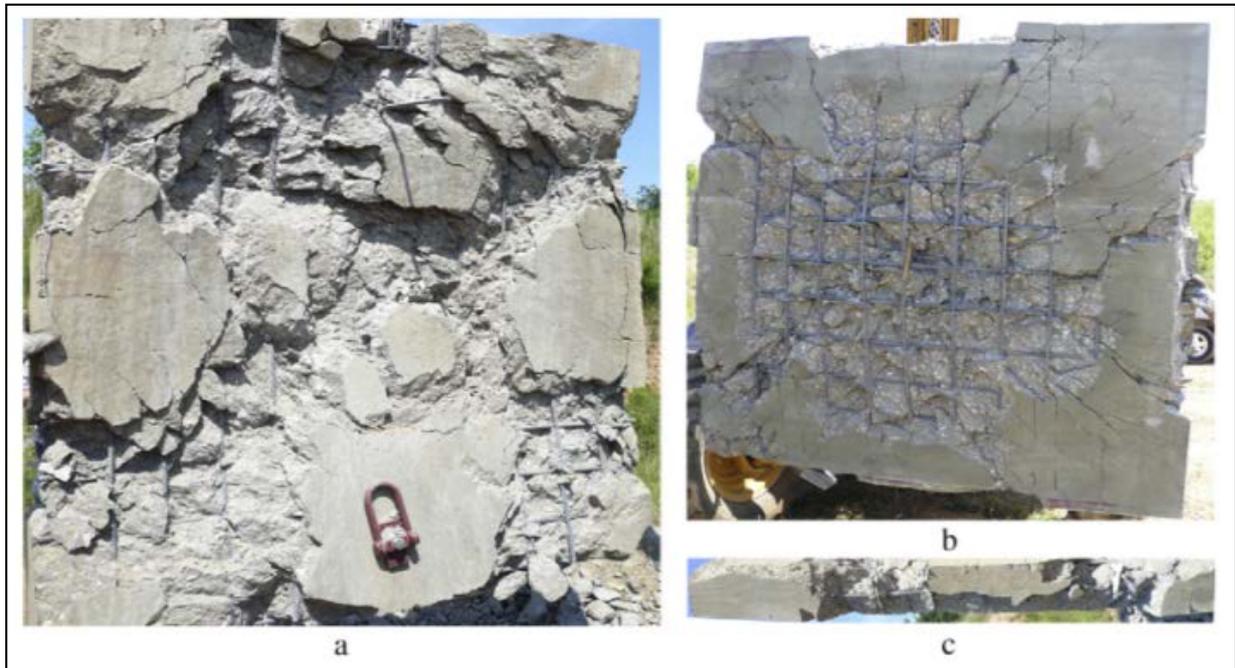


Figura 4.18: Panel de control; a) superficie expuesta, b) superficie inferior, c) de costado [28].

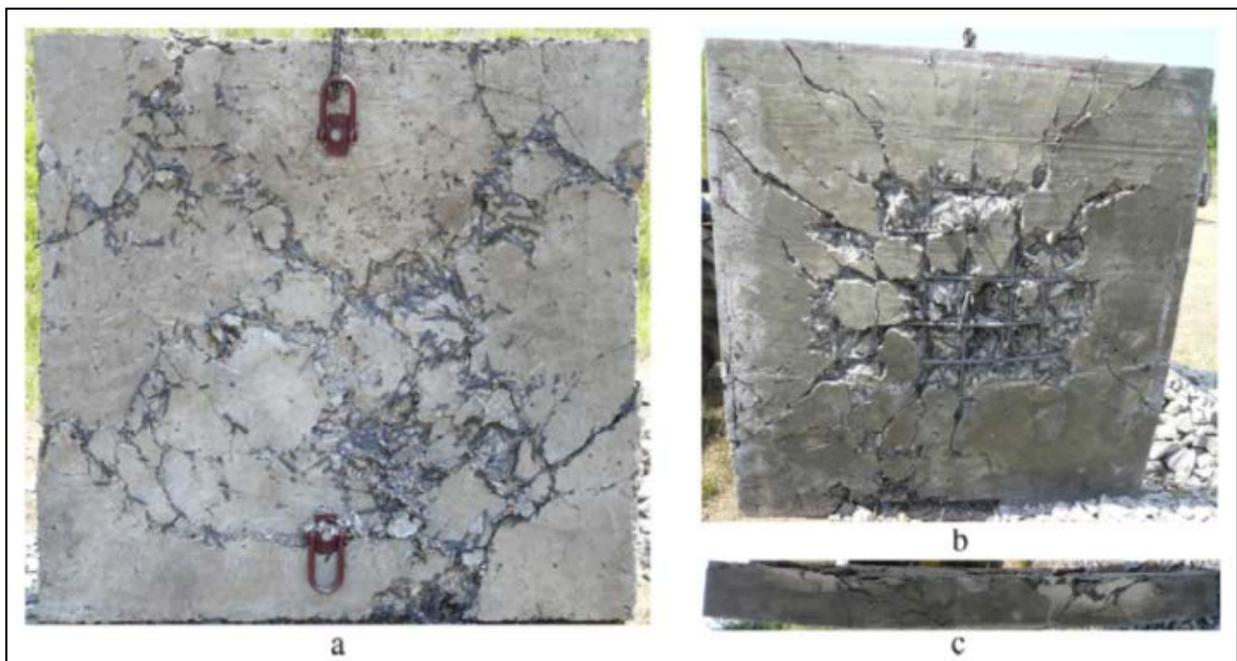


Figura 4.19: Fibras A, panel 1; a) superficie expuesta, b) superficie inferior, c) de costado [28].

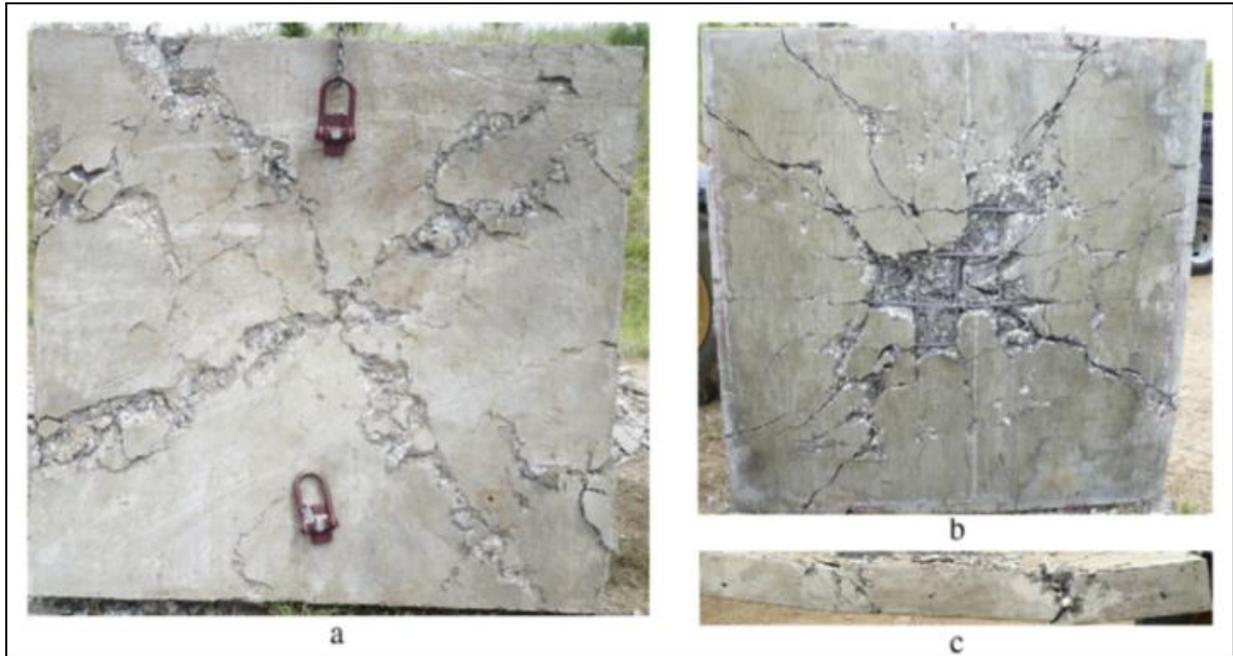


Figura 4.20: Fibras A, panel 2; a) superficie expuesta, b) superficie inferior, c) de costado [28].



Figura 4.21: Fibras B, panel 1; a) superficie expuesta, b) superficie inferior, c) de costado [28].

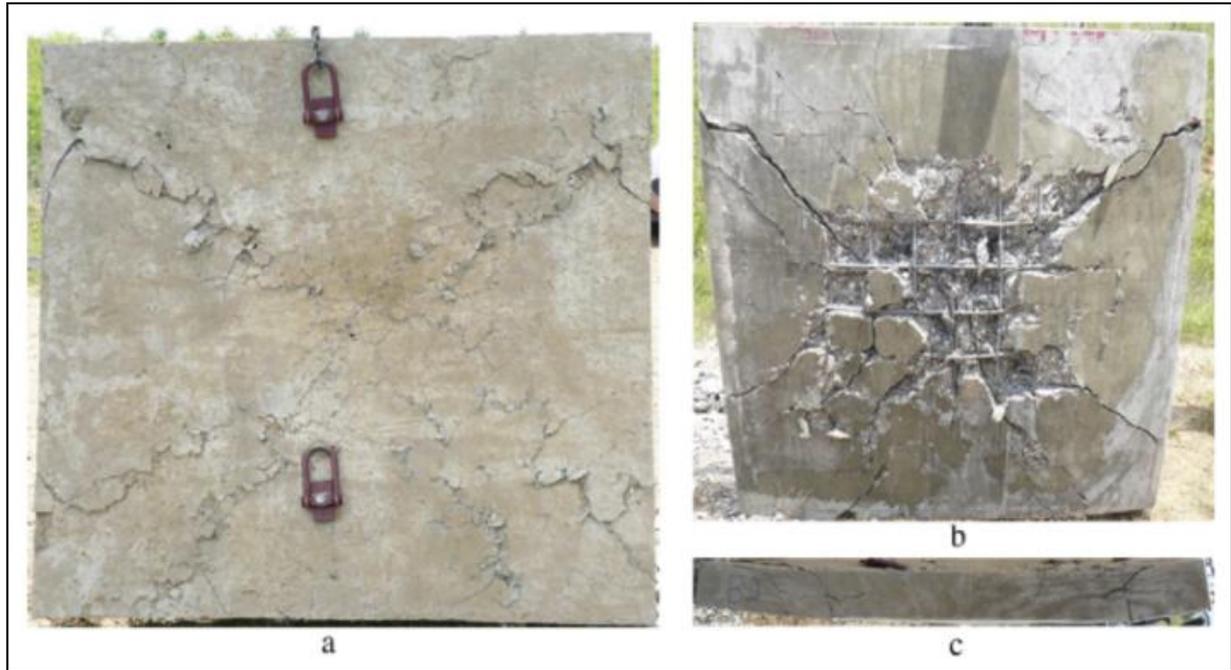


Figura 4.22: Fibras B, panel 2; a) superficie expuesta, b) superficie inferior, c) de costado [28].

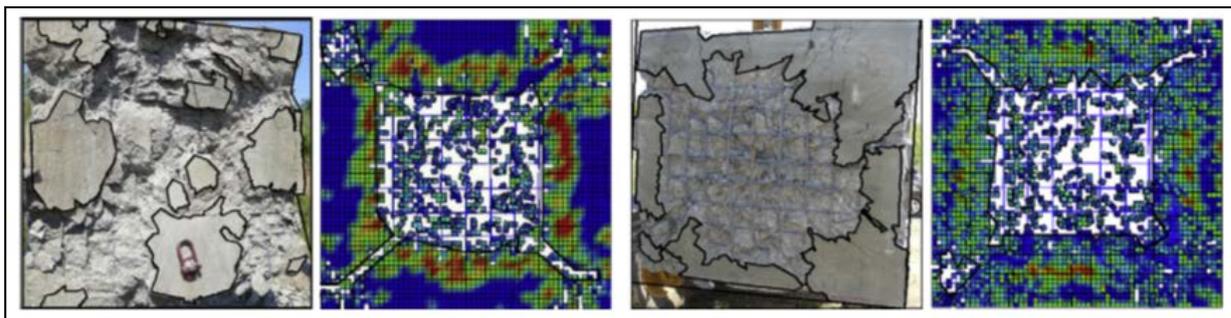


Figura 4.23: Comparación del daño superficial entre el modelo analítico (derecha) y experimental (izquierda) del panel de control [28].

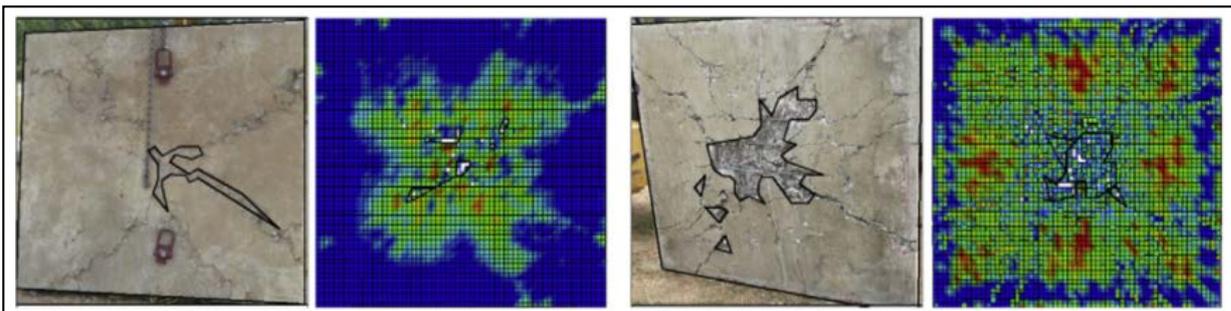


Figura 4.24: Comparación del daño superficial entre el modelo analítico y experimental del panel con fibras B [28].

Conclusiones:

- La comparación de pérdida de peso de los paneles muestra que la adición de fibras de carbono largas en el hormigón, tanto del tipo A como el B, aumento significativamente la resistencia a los desprendimientos del hormigón.
- Los paneles reforzados con fibras de carbono superaron a los paneles de control en un factor de 10 en cuanto a material perdido en la prueba.
- Las fibras de carbono redujeron también el agrietamiento de los paneles de hormigón. Esta reducción se correlaciona con el gran aumento a la resistencia explosiva de estructuras construidas con hormigón armado reforzado con fibras.
- La superficie de los paneles muestra una disminución significativa en el daño de los paneles de hormigón reforzados con fibras de carbono largas. Esta reducción fue de entre 75 - 89%. Esta mejora por sobre el hormigón armado tradicional reduciría en gran medida la letalidad de una explosión a personas ubicadas detrás de una pared construida con este hormigón reforzado con fibras.
- El modelado por elementos finitos fue bastante acertado y es una muy buena alternativa para describir la respuesta del hormigón armado reforzado con fibras de carbono cuando una prueba explosiva a escala real no es factible [28].

4.6 Ensayo de comportamiento a fatiga de hormigón reforzado con PRFC bajo cargas de flexión cíclica.

En esta parte se resume un trabajo realizado por el Instituto de Tecnología de Harbin, China [27], en el cual ensayaron vigas en cuatro puntos para analizar la fatiga y el comportamiento a la deformación por fatiga del hormigón reforzado con fibras de carbono (HRFC). Se pudo demostrar que en el proceso de deformación por fatiga, con HRFC con diferentes resistencias, se comporta de distintas maneras en tres etapas bien definidas ante la duración de la fatiga.

Para todas las pruebas se utilizaron vigas ensayadas a flexión en cuatro puntos. El esquema se puede ver en la Figura 4.25. Todas las pruebas se realizaron con un sistema de

pistón hidráulico de 10 kN de capacidad de carga. La carga sinusoidal aplicada se aplicó con una frecuencia de 0,1 y 10 Hz.

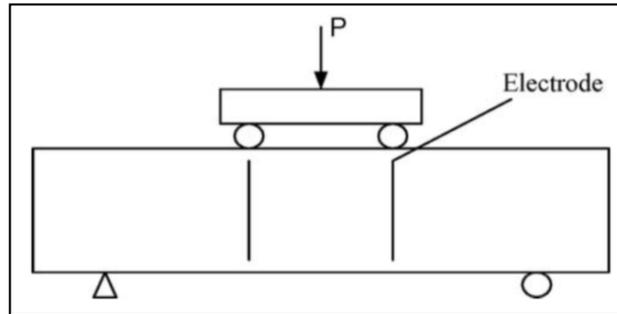
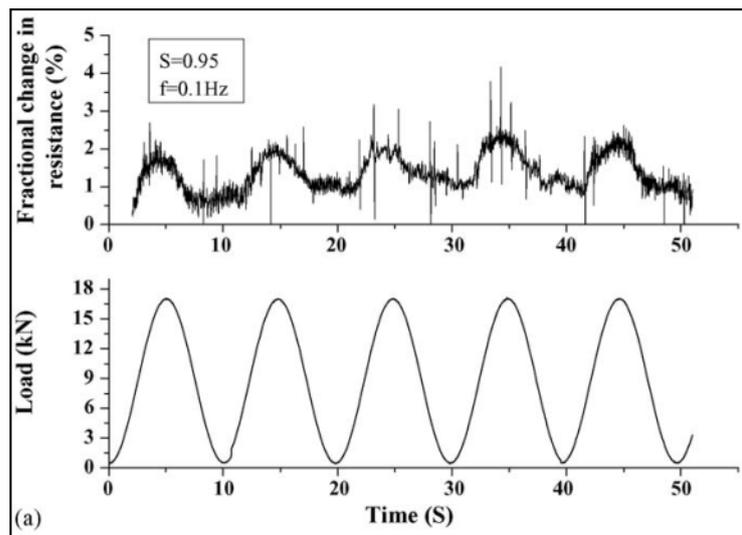


Figura 4.25: Esquema de ensayo [27].

Lo que se midió en los ensayos fue lo siguiente:

- La deflexión en el centro del tramo utilizando un transductor de desplazamiento variable lineal ubicado entre los rodillos.
- La deformación en la parte inferior del espécimen se midió usando dos bandas extensométricas adheridas en la parte inferior, en dirección paralela al eje horizontal del espécimen.
- Se midió la resistencia eléctrica del espécimen.

En los siguientes gráficos se puede apreciar la variación en la resistencia eléctrica de la viga durante la carga flexional cíclica a la que fue sometida.



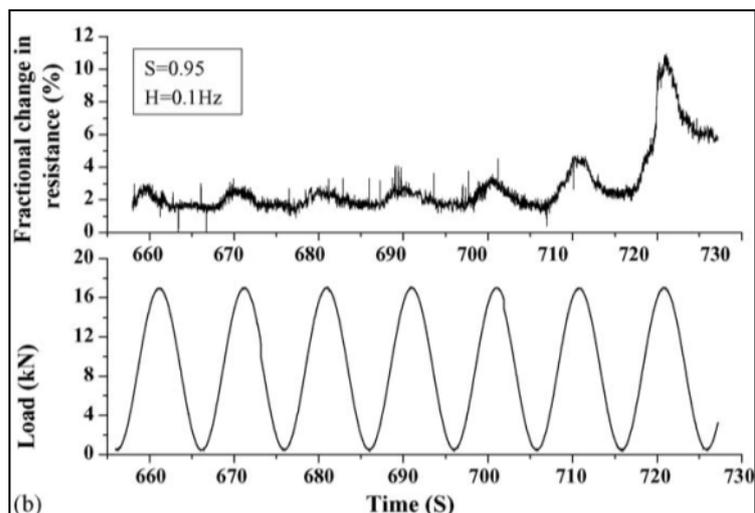


Figura 4.26 a y b: Diferencia fraccional en la resistencia eléctrica durante una carga flexional repetitiva [27].

Conclusiones:

- El hormigón reforzado con fibras muestra el mismo comportamiento a la deformación por fatiga que el hormigón armado común, es decir, la deformación se desarrolla en tres etapas bien definidas a lo largo del crecimiento de la fatiga. Sin embargo, la fibra de carbono mejora la resistencia a la fisuración y tiene un efecto beneficioso en el desarrollo de la fatiga y la capacidad de absorción de energía del hormigón.
- El daño en HRFC puede ser monitoreado midiendo la resistencia eléctrica del elemento estructural. La resistencia residual ocurre con la carga cíclica ya avanzada. A mayor tensión, más rápido avanza la deformación, hay mayor daño por fatiga y es mayor la resistencia residual.
- Este mecanismo formado en este estudio proporciona una forma de monitorear el HRFC bajo fatiga y predecir la viga y desarrollo de la fatiga [27].

4.7 Ensayos sobre vigas de hormigón reforzadas con mallas de fibras de carbono.

4.7.1 Introducción

En este apartado se describirá en profundidad un ensayo sobre vigas de hormigón armado reforzado con fibras realizado en Alemania en el marco de una pasantía para la UTN y el DAAD (servicio de intercambios alemán). Se trabajó en equipo con el doctorando M.Sc. Cristoph Shulte, quien dio las directivas para los ensayos y audito el informe final correspondiente.

Para realizar este ensayo se elaboraron seis vigas de hormigón de 70 x 250 x 700 mm, dos armadas solo con mallas de fibras de carbono de abertura chica, otras dos solo con mallas de fibras de carbono de abertura grande y finalmente dos vigas armadas con tres barras $\phi 10$ mm, a modo de que todas tengan una resistencia final similar. Este método de refuerzo es el NSM con el hormigón en estado fresco, es decir utilizando las mallas como remplazo del refuerzo tradicional de acero. En principio, este refuerzo le provee al hormigón un comportamiento superior hasta la falla, mejorando el comportamiento de las fisuras por flexión, ya que se originan pero en una cantidad mayor y con un espesor más reducido, en comparación con las vigas armadas con barras de acero.

Veamos a continuación la dosificación del hormigón utilizado para elaborar las vigas:

Cemento	Agua	Relación A/C	Arena 0-2 mm	Grava 2-8 mm	Grava 8-16 mm	Incorporador de aire
[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	M.-% v. Z.
340	163	0,48	463	606	713	0,05

Ensayamos probetas a 28 días para determinar la resistencia a la compresión de este pastón. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Número de probeta	Resistencia a compresión probeta cúbica [N/mm ²]	Resistencia a compresión probeta cilíndrica [N/mm ²]
1	32,19	(29,26)
2	30,02	(27,29)
3	30,66	(27,87)



Figura 4.27: Ejecución de un ensayo a compresión.

Por lo tanto el hormigón es un C25/30, o un H25, como se lo prefiera llamar. Luego realizamos el ensayo de asentamiento con la mesa de Graff, determinación de aire incorporado, y peso específico.

Después de esto procedimos al hormigonado de las vigas. Utilizamos mallas de fibras de carbono, de abertura grande y chica.

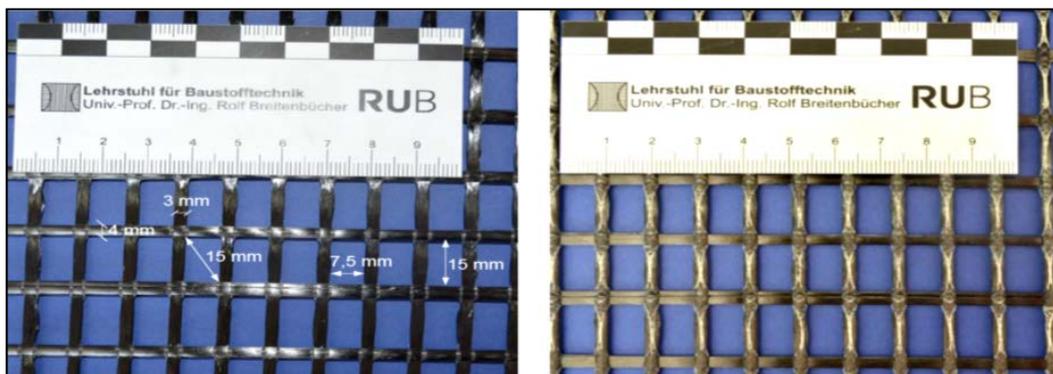


Figura 4.28: Malla de fibra de carbono de abertura chica.

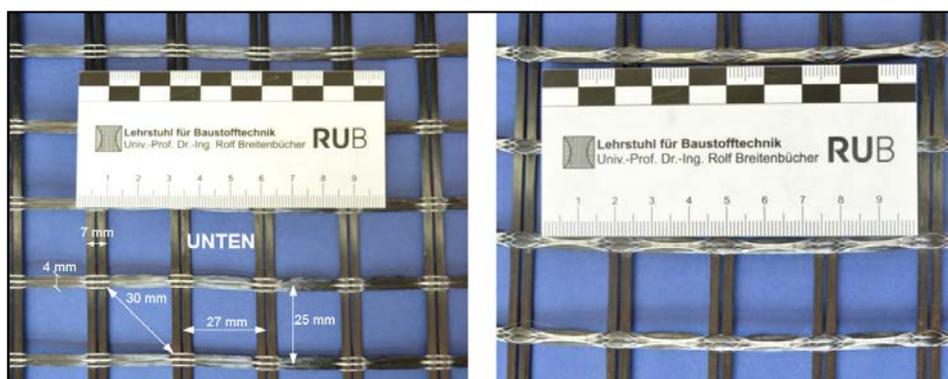


Figura 4.29: Malla de fibra de carbono de abertura grande.

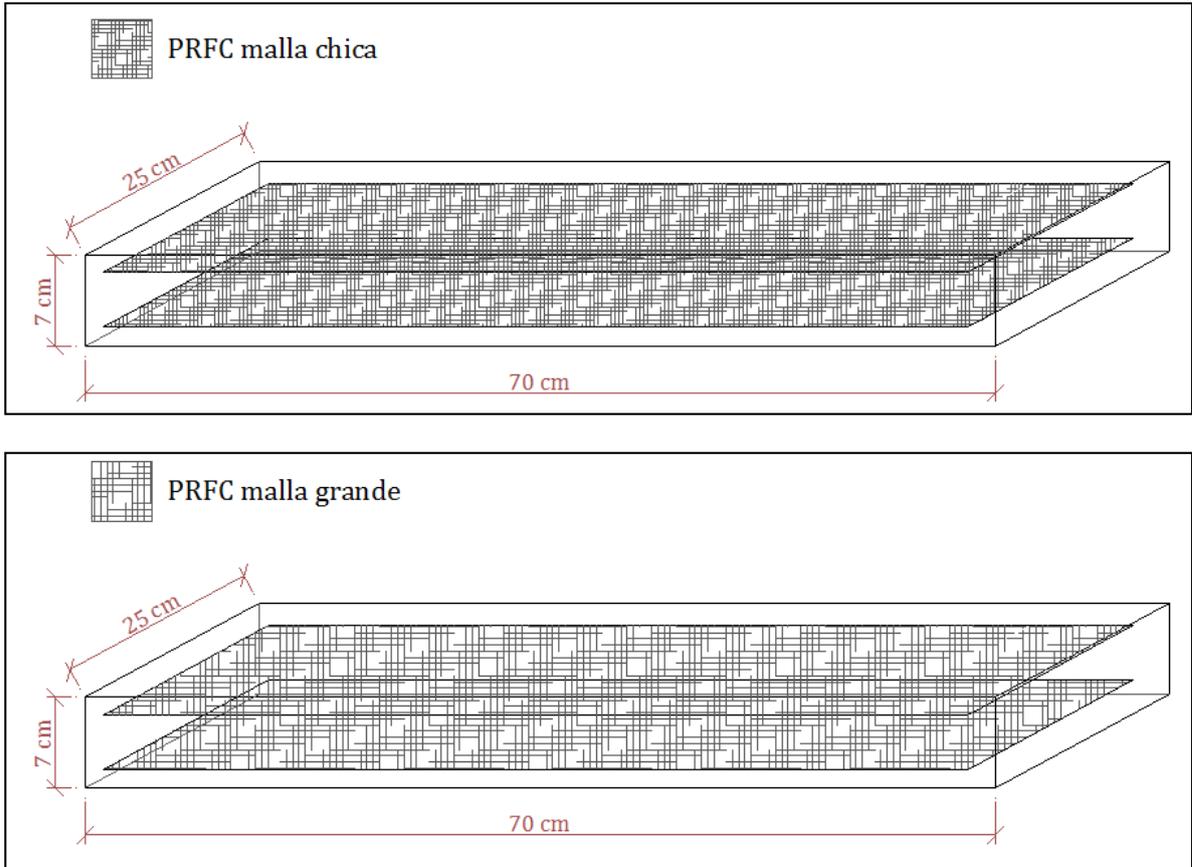


Figura 4.30: Detalles de armado. Recubrimiento de 20 mm.



Figura 4.31: Hormigonado y colocación de las mallas.



Figura 4.32: armado de las vigas con barras de acero ϕ 10mm.

Como se puede observar en la Figura 4.32, las barras de acero son cortas y no llegan al extremo del encofrado. Las barras tienen 40 cm y el largo total de la viga es de 70 cm. En cambio, las mallas que se usaron para reforzar las otras vigas se cortaron a medida y cubrieron toda la superficie del encofrado en ambas caras.

Las vigas se ensayaron a flexión en cuatro puntos utilizando una prensa hidráulica. La fuerza aplicada y la deflexión de las vigas se midieron con la prensa y además se agregaron comparadores LVDT (del inglés, *linear variable differential transformer*) a cada lado de las vigas para medir también el descenso de las mismas de una manera más precisa. Los datos de salida fueron guardados con un software para su posterior análisis.



Figura 4.32: Ensayo a flexión en curso.

El esquema estático de las vigas es el siguiente, con el momento flector en el tercio central del tramo, en correspondencia con los mayores esfuerzos de tracción en la parte inferior de la viga.

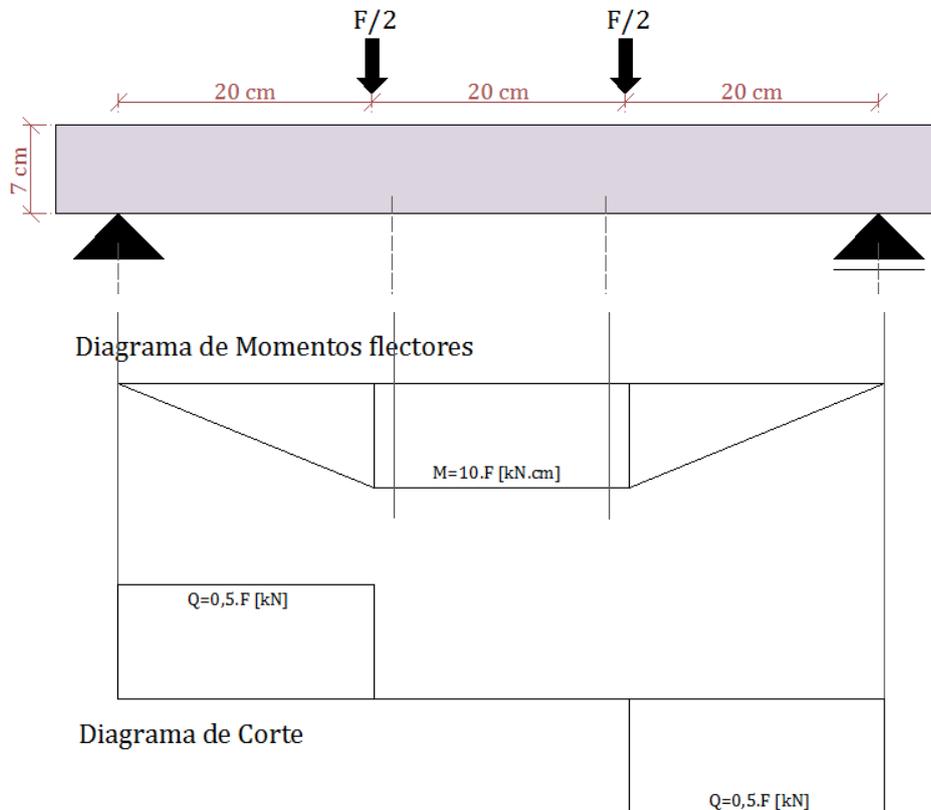


Figura 4.33: Esquema estático y diagramas de esfuerzos característicos.

A continuación veremos algunas imágenes de las distintas vigas en el transcurso del ensayo, se podrá apreciar el momento en el que ocurre la primera fisura, y para que carga y tensiones en el hormigón ocurrieron.

Recordemos que se ensayaron un total de seis vigas, dos de las cuales se reforzaron con tres barras de acero $\phi 10\text{mm}$ ubicadas a la mitad de la altura de la viga. Lamentablemente las barras no fueron lo suficientemente largas y debido a esto ambas vigas fallaron por corte prematuramente. Sin embargo hasta ese punto se pudo apreciar el desarrollo del fisuramiento de las mismas.

4.7.2. Viga reforzada con tres barras $\phi 10\text{mm}$

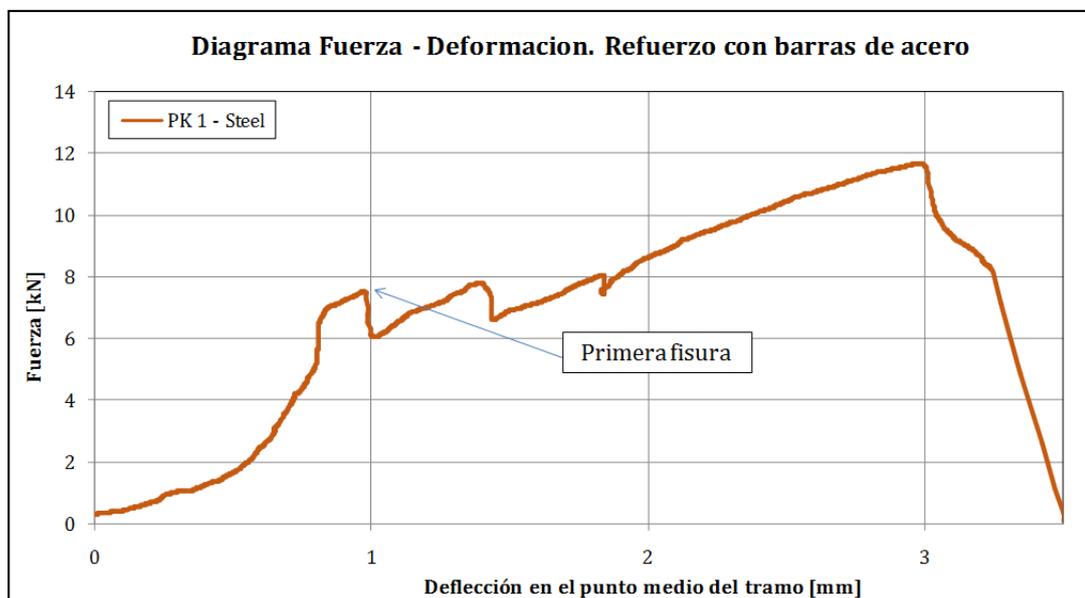
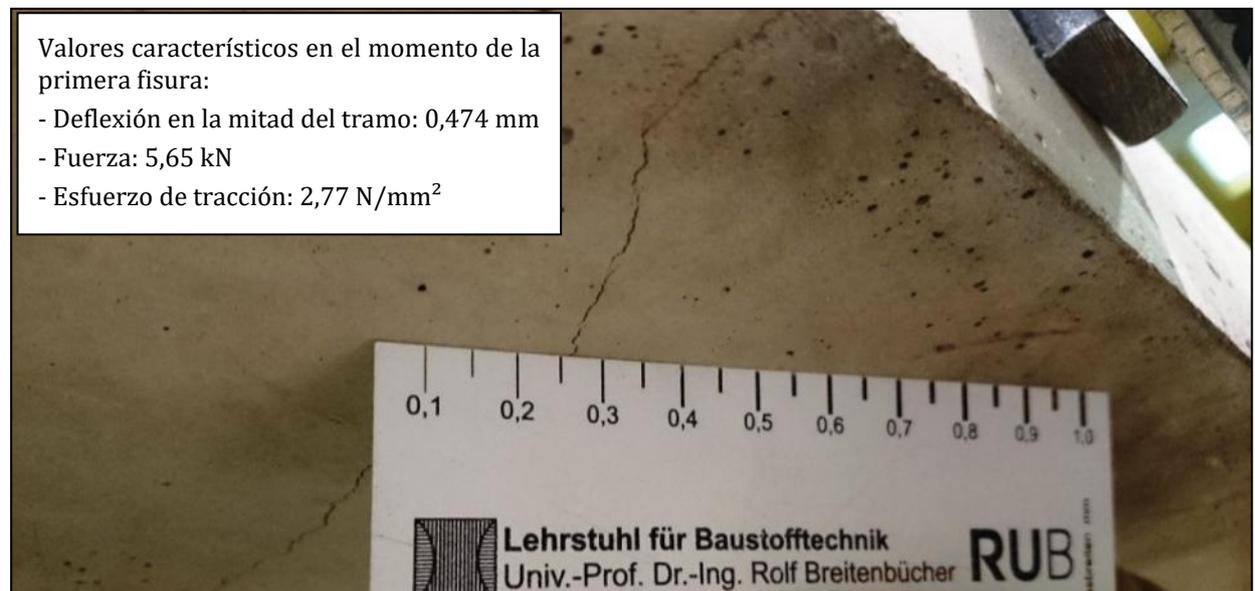


Figura 4.34: Primera fisura (arriba); diagrama correspondiente a dicho ensayo (abajo).



Figura 4.35: Viga reforzada con barras de acero. Momento de la falla (arriba). Falta de continuidad de las armaduras (abajo).

4.7.3 Viga reforzada con malla de fibras de carbono de abertura chica

Valores característicos en el momento de la primera fisura:

- Deflexión en la mitad del tramo: 0,948 mm
- Fuerza: 6,75 kN
- Esfuerzo de tracción: 3,31 N/mm²

Valores característicos en el momento de la primera fisura:

- Deflexión en la mitad del tramo: 1,482 mm
- Fuerza: 7,03 kN
- Esfuerzo de tracción: 3,44 N/mm²



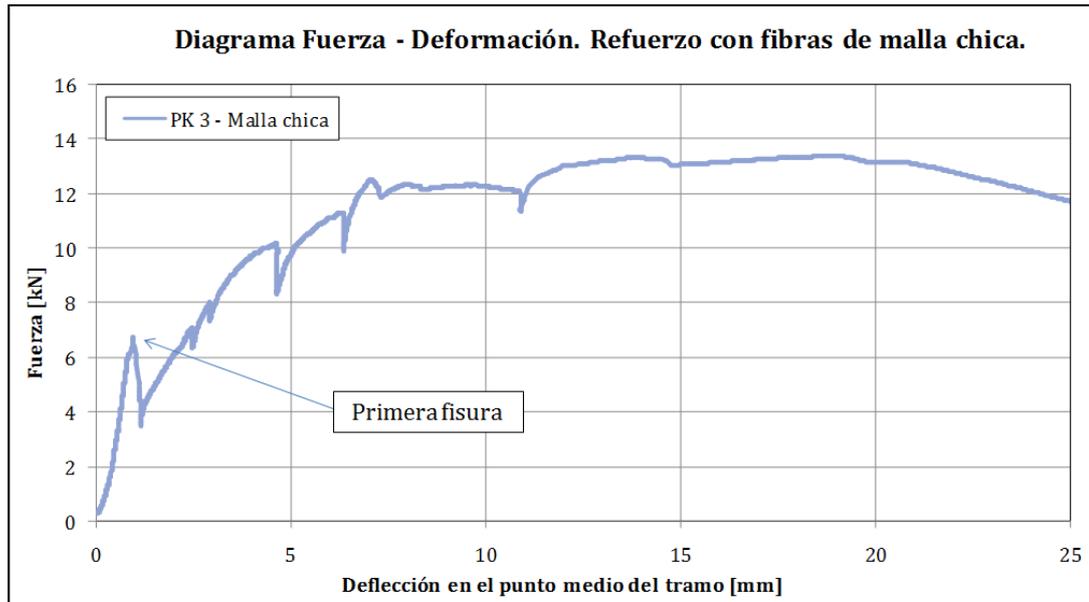


Figura 4.36: Primera fisura (arriba); diagrama correspondiente a dicho ensayo (abajo).

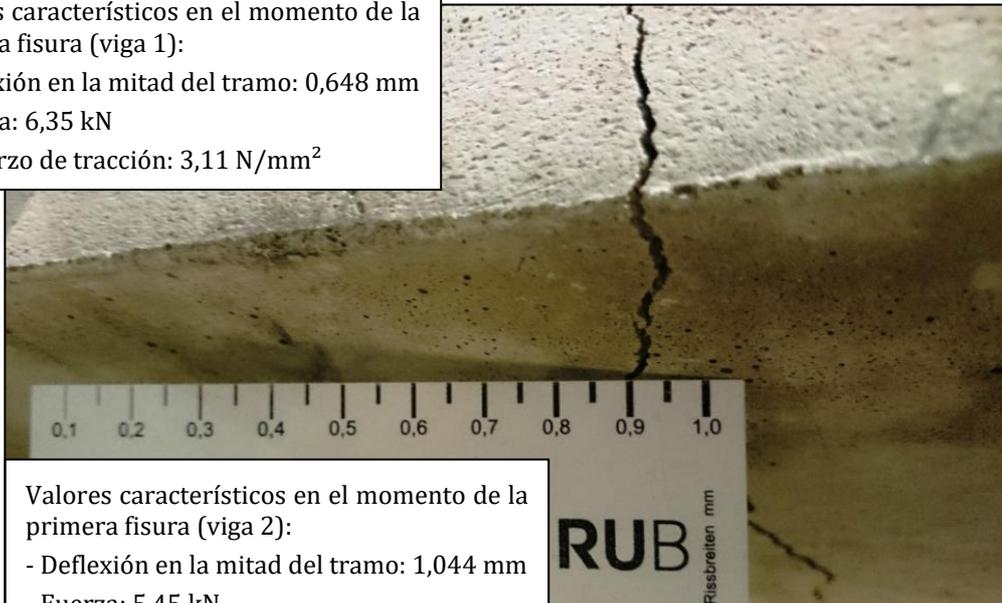


Figura 4.37: Viga reforzada con fibras luego de la rotura.

4.7.4 Viga reforzada con malla de fibras de carbono de abertura grande

Valores característicos en el momento de la primera fisura (viga 1):

- Deflexión en la mitad del tramo: 0,648 mm
- Fuerza: 6,35 kN
- Esfuerzo de tracción: 3,11 N/mm²



Valores característicos en el momento de la primera fisura (viga 2):

- Deflexión en la mitad del tramo: 1,044 mm
- Fuerza: 5,45 kN
- Esfuerzo de tracción: 2,67 N/mm²

Todas las vigas armadas con fibras de carbono fallaron después de una deformación excesiva con una sola gran fisura y la consecuente falla por agotamiento del hormigón, como se puede apreciar en la siguiente figura:





Figura 4.38: Falla por agotamiento del hormigón.

4.7.5 Comparación entre refuerzo con barras de acero y con fibras de carbono

Como se puede observar en los siguientes diagramas (Figura 4.39 y 4.40), existe una diferencia en el comportamiento a la fisuración entre las vigas armadas con acero y las armadas con fibras. Se puede apreciar que en las vigas armadas con fibras hubo una mayor cantidad de fisuras pero de menor abertura, lo que es sumamente importante para evitar que agentes externos penetren en el hormigón y lo ataquen, comprometiendo la durabilidad del mismo. Además, ante estos casos, el acero también puede corroerse, lo que no sucede con las fibras. En los aspectos de durabilidad es evidente la superioridad de estos sistemas.

Lo dicho anteriormente es válido hasta un cierto rango de cargas, ya que ambas vigas armadas con barras de acero fallaron prematuramente debido a una falta de continuidad de las armaduras provocando una falla por corte. No sabemos cómo se hubiesen podido comportar después de esto.

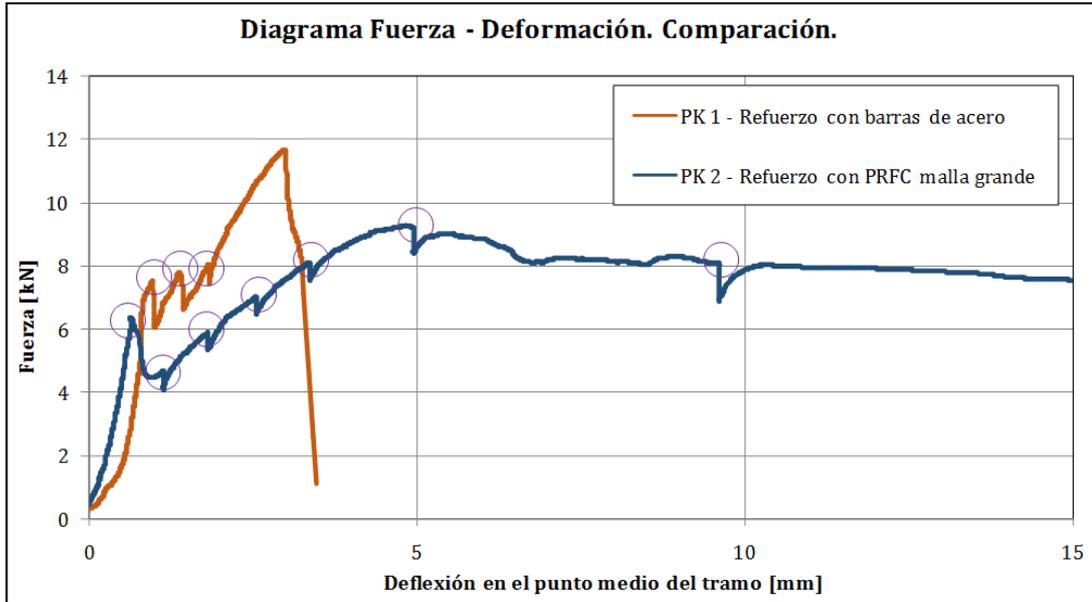


Figura 4.39: Diagramas fuerza – deflexión en el punto medio. Análisis del fisuramiento.

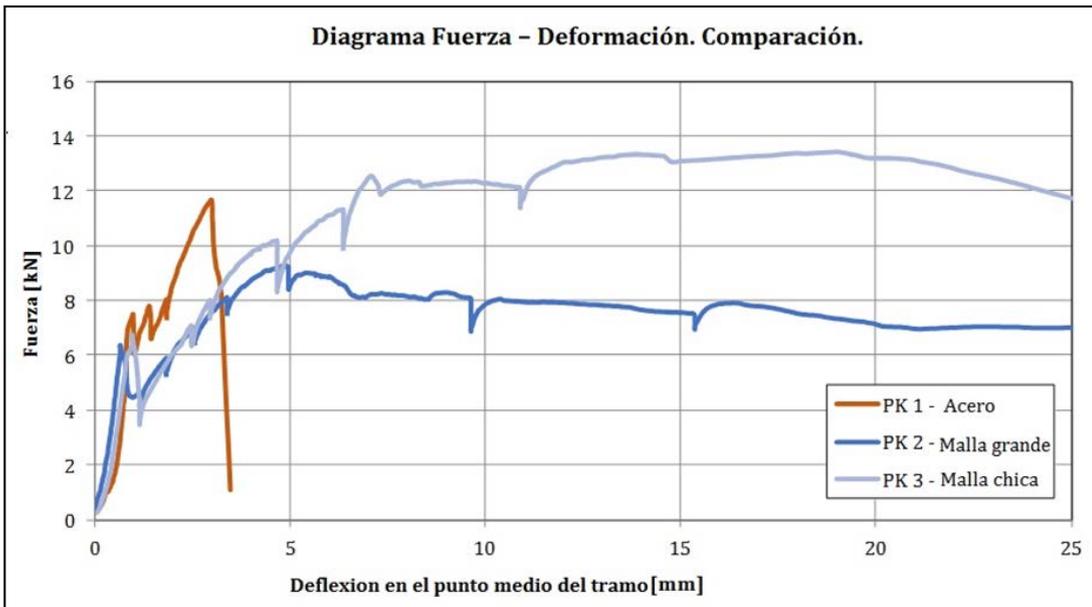


Figura 4.40: Diagramas fuerza – deflexión en el punto medio. Análisis del fisuramiento. Comparación entre los distintos refuerzos.

4.7.6 Conclusiones

1. Las vigas reforzadas con fibras de carbono mostraron un mejor comportamiento a la fisuración, con una mayor cantidad de fisuras no visibles, en comparación con las armadas con barras de acero.
2. También demostraron un muy buen comportamiento al corte, sin fisuras visibles en la zona de máximos esfuerzo de corte.
3. Las vigas armadas con acero fallaron por corte ya que como se menciono, las barras eran cortas y no llegaban al extremo de la viga, por lo tanto no se pudo determinar su resistencia y deformación máxima posible.
4. La resistencia última fue similar en todos los ensayos.
5. No se observaron diferencias en el comportamiento de las vigas armadas con mallas de abertura chica y abertura grande.

4.8 Ensayos parcialmente destructivos

4.8.1 Ensayo de adherencia por tracción directa (pull-off)

Normativa vigente para el ensayo por tracción directa UNE EN 1542-2000: “Productos y sistemas para la protección y preparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayos. Determinación de la adhesión por tracción directa” [43]. El ensayo de arrancamiento se realizará antes del inicio de los trabajos, junto con la toma de datos para el cálculo del refuerzo en función de las propiedades del soporte de hormigón. Se realiza de la siguiente manera:

- Se realiza una perforación superficial, sobre la superficie a realizar el ensayo, con una profundidad de 5-10 mm, por medio de un taladro eléctrico con una corona de carburo de tungsteno o una barrena tubular con corona de diamante. El diámetro será de 50 mm. La superficie de la sufridera de metal tiene que estar lijada, limpia y libre de grasa. El diámetro de las sufrideras será de 50 mm.



Figura 4.41: Ensayo de Pull-off en curso [12].

- Aplicar un sistema para la fijación de anclajes compuesto por una resina epoxi de dos componentes libre de disolventes en la superficie de hormigón y en la cara de la sufridera, y se adhiere al hormigón permitiendo que cure el adhesivo. Una vez curada la resina, fijar el equipo de medición a la sufridera y se procede al arrancamiento para obtener las

medidas de la resistencia del hormigón, tal y como indica el procedimiento del ensayo según la norma citada anteriormente [43].



Figura 4.42: Dispositivo para el ensayo [43].

Existen también otros ensayos muy importantes a la hora de determinar la calidad del trabajo realizado, como el ensayo de adherencia al corte, a la torsión, al pull-out, ultrasonido, pruebas de carga, cuyo procedimiento escapa a los alcances de este trabajo.

Se detalló el ensayo de pull-off porque es el más utilizado y es sumamente importante para determinar la resistencia de la superficie de hormigón con el objetivo de verificar que se pueda desarrollar la totalidad del esfuerzo sobre el refuerzo de PRFC sin que haya desprendimientos del hormigón.

En la ejecución del ensayo, el desprendimiento del hormigón se debe producir con una tensión mayor a 15 kg/cm^2 con falla del hormigón [12].

4.9 Ensayo sobre probetas de hormigón confinadas con PRFC

4.9.1 Introducción

En este apartado se expone un trabajo realizado por investigadores de la U.T.N. Facultad Regional de Concepción del Uruguay [44], donde evaluaron experimentalmente el comportamiento de probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón armado confinadas externamente con PRFC y sometidas a carga axial. Además, se analizó la respuesta tensión - deformación axial y los tipos de falla para ambos tipos de especímenes, de hormigón simple y armado. En ambos casos, el refuerzo externo de PRF incrementó la resistencia a compresión y le brindó ductilidad a las probetas, confinando al hormigón y conteniéndolo luego de su falla.

Se presenta un estudio comparativo entre los resultados experimentales, los que se obtienen según la norma ACI 440 2R-02 [3] y los estimados por tres modelos empíricos existentes en la literatura.

4.9.2 Programa experimental

Se prepararon seis probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón armado de 150 x 300 mm según la norma IRAM 1534 según se detalla en la siguiente tabla:

Probeta	Armado	A_s	A_{st}	Refuerzo
PNA1	H° Simple	-	-	-
PNA2	H° Simple	-	-	-
PA1	H° Armado	4 ϕ 6	3 ϕ 4,2	-
PA2	H° Armado	4 ϕ 6	3 ϕ 4,2	-
PNAR	H° Simple confinado con PRFC	-	-	Tejido de fibra de carbono y resina epoxi
PAR	H° Armado confinado con PRFC	4 ϕ 6	3 ϕ 4,2	Tejido de fibra de carbono y resina epoxi

Tabla 4.43: A_s = Armadura longitudinal; A_{st} = Armadura transversal [44].

Para la elaboración del hormigón se utilizaron agregados de la zona y cemento portland normal. La dosificación se hizo con el objetivo de obtener una resistencia característica a compresión de 13 MPa a los 14 días, para lo cual se utilizó un acelerante de fragüe.

Como material de confinamiento para los especímenes reforzados externamente se utilizó un tejido unidireccional de fibra de carbono SikaWrap Hex 103 C de alto módulo elástico y alta resistencia saturado en obra con la resina epoxi Sikadur Hex 300.

En todos los casos, las probetas fueron ensayadas a compresión uniaxial según norma IRAM 1546 a los 14 días de ser coladas.

4.9.3 Proceso de aplicación del refuerzo de PRFC

El refuerzo se realizó envolviendo la superficie de las probetas previamente imprimadas con resina, con el tejido de fibra de carbono embebido en resina poxi, siguiendo el proceso húmedo y asegurando un solape de 7 cm como se puede apreciar en la Figura 7.44. Antes de la colocación del material de refuerzo, las superficies fueron pulidas con cepillo de cerdas de acero para eliminar el polvo e imperfecciones superficiales, y se aplicó aire con un compresor. Se colocó una sola capa de refuerzo de 1 mm de espesor con las fibras orientadas en la dirección circunferencial.



Figura 4.44: Aplicación de refuerzo (izquierda) y montaje usado en los ensayos (derecha) [44].

En la Figura 4.44 (derecha) se muestra el montaje utilizado en los ensayos. La carga fue aplicada usando una prensa manual y se usó un flexímetro para medir fuerzas. Para medir los desplazamientos verticales se utilizó otro flexímetro instalado a la mitad de la probeta.

En el transcurso de los ensayos se midieron cargas y desplazamientos axiales a partir de los cuales se construyeron diagramas tensión – deformación.

En las probetas PNA1 y PNA2 se observó el tipo de falla típico para compresión uniaxial, con fisuras paralelas a la dirección de aplicación de la carga.

En la probeta PNAR, reforzada con una capa de PRFC, se observó una falla repentina al cortarse un conjunto de fibras del refuerzo que se inició en la zona de solape de los tejidos, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 4.45: Falla de la probeta confinada con PRFC.

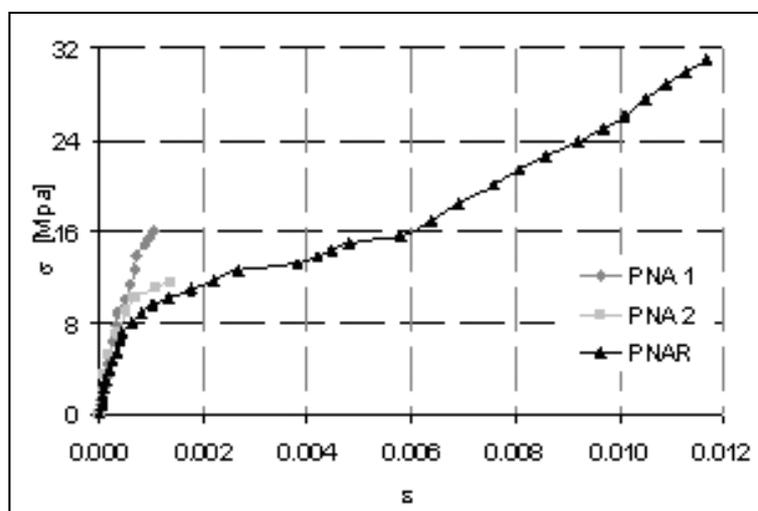


Figura 4.46: Diagramas tensión – deformación para las probetas de hormigón simple.

En el caso de las probetas de hormigón armado no reforzadas con PRFC, PA1 y PA2, las cargas máximas fueron similares a las de las probetas de hormigón simple sin confinar.

La falla de la probeta PAR confinada con 1 capa de PRFC se produjo para una carga de 606 kN. En ese caso, la rotura fue repentina también al cortarse algunas fibras del refuerzo y fue precedida por ruidos asociados a la rotura de la interfase entre la superficie

de las probeta y el material compuesto, y a la deformación no uniforme de las fibras, similarmente a como ocurrió con la probeta PNAR. No se produjo pandeo de las barras longitudinales de acero ni desintegración del núcleo de hormigón.



Figura 4.47: Rotura de la interfase material compuesto – hormigón.

En la Figura 4.48 se reproduce el diagrama tensión – deformación axial del hormigón sin confinar y del hormigón confinado con PRFC:

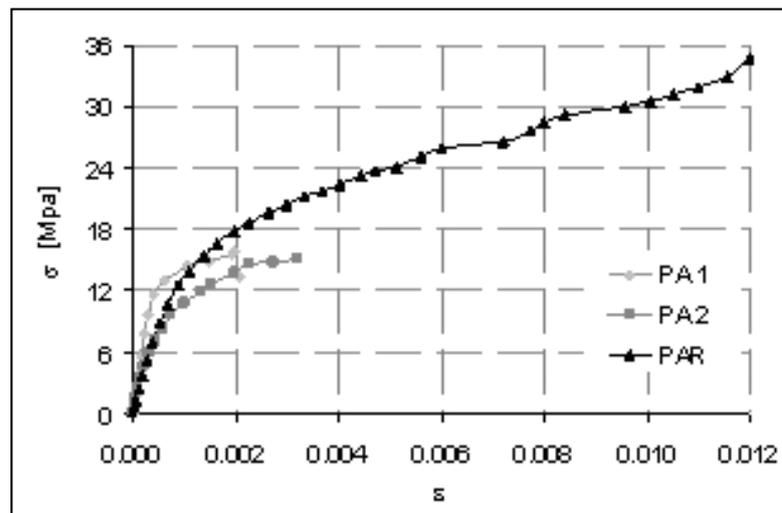


Figura 4.47: Comparación diagrama tensión – deformación.

En la Tabla 4.48 se presentan los valores de carga máxima P_{max} , tensión máxima y deformación máxima alcanzados en el ensayo de compresión uniaxial de todas las probetas. Se puede ver una mayor resistencia de las probetas confinadas y una deformación axial considerablemente mayor con respecto al hormigón sin confinar. La

eficiencia del confinamiento es ligeramente mayor en el hormigón simple que en el armado. También se puede concluir que el refuerzo por confinamiento con PRFC es más efectivo que el refuerzo con barras de acero.

3	$P_{rot.}$ (kN)	$\sigma_{max.}$ (MPa)	$\epsilon_{max.}$
PNA1	287,00	16,24	0,0011
PNA2	206,42	11,68	0,0014
<i>Promedio</i>	<i>246,71</i>	<i>13,96</i>	<i>0,0013</i>
PNAR	547,71	31,00	0,0117
PA1	287,30	16,25	0,0020
PA2	276,65	15,66	0,0032
<i>Promedio</i>	<i>281,98</i>	<i>15,96</i>	<i>0,0026</i>
PAR	606,00	34,29	0,0120

Tabla 4.48: Comparación de resultados.

4.9.4 Conclusiones

A pesar de que el número de ensayos realizado no fue muy grande, se pudo determinar lo siguiente:

- El confinamiento lateral mediante la envoltura de láminas o tejidos de PRFC ha demostrado ser muy eficiente ya que incrementa la resistencia y ductilidad de las probetas. Esto se debe al desarrollo de un estado triaxial de tensiones que confina y contiene al hormigón luego de que este ha sido dañado [44].
- Se debe asegurar una perfecta adherencia entre el hormigón confinado y el PRFC, así como también una longitud de solape adecuada que evite el despegue del refuerzo y la consiguiente falla frágil de los especímenes [44].
- Los valores de resistencia máxima a compresiones axial obtenidos a partir de las formulas del ACI y de modelos empíricos existentes, tanto en el caso de probetas de hormigón simple como en el caso de hormigón armado, resultaron menores a las experimentales en el primer caso y sustancialmente mayores en el segundo, excepto con el modelo de Lin y Liao, con el cual se logró un mejor ajuste de los datos de laboratorio [44].

De todas maneras, para poder arribar a conclusiones más generales es necesario continuar realizando ensayos y analizar otras variables como por ejemplo, la cantidad optima de PRFC, en cuanto al número de capas, longitud adecuada de solape para evitar falla frágil por perdida de adherencia que se produce en esa zona, y otros esquemas de refuerzo y PRF's [44].

Capítulo 5

CRITERIOS DE DISEÑO Y CÁLCULO

5.1 Introducción

El refuerzo de estructuras mediante sistemas adheridos externamente es una técnica eficiente que confía en la acción conjunta del elemento de hormigón y el refuerzo exterior. Es muy importante la elección del sistema más apropiado, el diseño correcto y su ejecución, así como conocer el estado y las condiciones en las que se encuentra dicha estructura. Esto significa no solo determinar la resistencia del hormigón o del material a reforzar y su superficie, sino analizar el estado de deterioro, identificar las deficiencias y sus causas, y otras cosas para hacer una evaluación global y saber de manera más precisa como proceder. Esta evaluación global debe considerar una inspección de la zona, una revisión del diseño existente o documentos y un análisis estructural. Los documentos de la construcción existentes deben ser revisados, incluyendo los planos de diseño, especificaciones de proyecto, informes de campo, documentación de reparaciones anteriores y la documentación de mantenimiento en caso de que existiera. El ingeniero debe llevar a cabo una minuciosa investigación de la estructura existente. La resistencia a tracción de las superficies del hormigón armado donde el sistema de PRFC vaya a ser instalado debe ser evaluada mediante un ensayo de pull-off. En conclusión, se debe verificar lo siguiente [1]:

- Dimensiones reales de los elementos estructurales.
- Ubicación y gravedad de la corrosión en el acero.
- Ubicación, tamaño y causas de grietas y fisuras.
- Cantidad y ubicación del refuerzo de acero.
- Verificación de la resistencia a compresión del hormigón mediante la extracción de testigos.
- Análisis de la superficie del hormigón donde el sistema de refuerzo debe adherirse.
- Pruebas de carga, en caso de ser necesario.

Luego de verificar lo anterior se puede determinar la capacidad de carga de la estructura existente. Se puede consultar con las empresas que comercializan los sistemas de PRFC para asegurarse que el sistema elegido y el revestimiento de protección son los correctos para la finalidad que se pretende.

En este capítulo se detallarán primero las recomendaciones generales para el diseño de elementos de hormigón armado sometidos a flexión y corte que aparecen en las dos guías de diseño que más aplicación tienen actualmente a nivel mundial para estos tipos de refuerzo. Estas son:

- Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (*Guía para el diseño y construcción de sistemas de PRF adheridos externamente para reforzar estructuras de hormigón*), American Concrete Institute ACI - Committee 440 [3].
- Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures (*Boletín 14. Refuerzo adherido externamente de PRF para estructuras de hormigón armado*), Fédération Internationale du Béton FIB [1].

Luego se detallarán los criterios de diseño y cálculo de refuerzos de fibra de carbono en vigas de hormigón armado para solicitaciones a flexión según la guía ACI 440, ya que es el método de cálculo en el cual se basa la normativa actual para estructuras de hormigón armado en nuestro país (CIRSOC 201-2005) y además es la utilizada por las empresas distribuidoras de estos sistemas para el diseño de los mismos. Es importante destacar que se trata de una guía y no una norma vigente en Argentina, por tanto el procedimiento de diseño se presenta como recomendaciones. Actualmente no existe una norma en relación al refuerzo de estructuras de hormigón armado mediante la aplicación de polímeros reforzados con fibra de carbono [30].

5.2 Recomendaciones generales de diseño

5.2.1 ACI 440

Los sistemas de refuerzo con PRF deben ser diseñados para resistir las tensiones manteniendo la compatibilidad de deformaciones entre el PRF y las fibras extremas de hormigón. No puede ser considerado en el cálculo la resistencia a compresión del PRF [3].

Las recomendaciones de diseño se basan en los principios de cálculo de los Estados Límite. Este enfoque establece niveles aceptables de seguridad en los Estados Límites de Servicio (excesiva deformación y agrietamiento) y los Estados Límites Últimos (falla,

tensión de rotura, fatiga). En la evaluación de la resistencia nominal de un elemento estructural se deben evaluar los posibles mecanismos de falla y calcular los esfuerzos y tensiones del material [3].

Los coeficientes de seguridad de las acciones y los materiales deben tomarse de la guía ACI 318 [31]. En el ACI 440 se establecen coeficientes de reducción adicionales para la contribución del refuerzo de PRF que reflejan el menor conocimiento de estos sistemas de refuerzo. El ingeniero debe procurar la incorporación de más factores reductores de resistencia si hay incertidumbre respecto a la capacidad de servicio de los materiales existentes.

5.2.1.1 Límites de resistencia

Algunos técnicos y empresas que comercializan el producto recomiendan que el elemento estructural sin aplicar refuerzos PRF deba tener la suficiente resistencia para soportar un cierto nivel de carga. Con este pensamiento, en el caso de que el sistema de PRF sea dañado, la estructura todavía estaría capacitada para resistir un determinado nivel de cargas sin producirse el colapso. La recomendación del Comité ACI es que la resistencia de la estructura existente sea la suficiente para soportar el nivel de cargas descrito en la siguiente ecuación (5.1) [3]:

$$(\phi \cdot R_n)_{existente} \geq (1,1 \cdot S_{DL} + 0,75 \cdot S_{LL})_{nuevo} \quad (5.1)$$

donde:

ϕ : Coeficiente reductor de fuerza.

R_n : Resistencia nominal del elemento estructural.

S_{DL} : Cargas permanentes (muertas).

S_{LL} : Cargas variables (vivas).

5.2.1.2 Resistencia al fuego de la estructura

Las resinas poliméricas utilizadas tanto en los refuerzos laminados como en los tejidos pierden su integridad estructural con temperaturas que superan la temperatura de transición vítrea del polímero (T_g). Esta temperatura es variable y oscila entre los 60 y 82°C. Debido a las altas temperaturas que se alcanzan durante un incendio y la baja temperatura que resisten los sistemas de PRF, éstos no son capaces de durar mucho

tiempo en un incendio. Además, con frecuencia no es viable el aislamiento del sistema de PRFC para incrementar su resistencia al fuego porque la cantidad de aislamiento necesario para proteger el sistema es muy elevado [3].

Aunque el sistema de refuerzo de PRF tiene baja resistencia al fuego, la combinación del sistema PRF con una estructura existente de hormigón armado debe tener un nivel aceptable de resistencia al fuego. Esto puede ser atribuible a la resistencia al fuego de la estructura de hormigón existente. Vale mencionar que la resistencia de los refuerzos tradicionales de hormigón armado, principalmente el acero, se reduce también durante la exposición a las altas temperaturas debidas a un incendio.

La resistencia de un elemento estructural existente con una determinada resistencia al fuego debe satisfacer la siguiente condición si va a ser reforzado con un sistema PRFC [3]:

$$R_{n\theta} \geq S_{DL} + S_{LL} \quad (5.2)$$

donde:

$R_{n\theta}$: Resistencia nominal de la estructura original a temperaturas elevadas.

El valor de las cargas S_{DL} y S_{LL} deben ser determinadas utilizando los requerimientos de carga vigentes para la estructura. Si el sistema de PRFC está destinado a permitir por ejemplo un incremento de cargas vivas, los resultados de las cargas deben ser calculados utilizando estas cargas mayores [3].

La resistencia nominal de un elemento ante elevadas temperaturas $R_{n\theta}$ debe ser calculada para el periodo de tiempo requerido por el rango de resistencia al fuego y debe desestimar la contribución del sistema de PRF. El coeficiente de resistencia nominal de un miembro se determina según la ACI 216R, "Guía para determinar la resistencia al fuego de elementos de hormigón".

La resistencia al fuego de los elementos estructurales reforzados con PRF mejoran con el uso de algunas resinas, protecciones u otros métodos de protección al fuego, pero aún no ha sido suficientemente demostrado que aisle al sistema de PRF de las temperaturas que se alcanzan durante un incendio [3].

5.2.1.3 Selección de sistema de refuerzo

Las condiciones del entorno únicamente afectan a la resina y fibras de varios sistemas de refuerzo. El proyectista debe seleccionar el sistema de refuerzo basado en el conocimiento del sistema en las condiciones de servicio previstas: alcalinidad/acidez, expansión térmica, conductividad eléctrica, consideraciones de carga y durabilidad, selección de protecciones [3].

Se propone la tabla 5.1 que ilustra el coeficiente reductor aplicable a las fibras de carbono en función de su exposición a diferentes entornos, de forma que cuanto más agresivo es el entorno, mayor es el coeficiente reductor. La fibra de carbono es la que presenta mejores propiedades, con un coeficiente cercano a la unidad, lo que nos indica que su fiabilidad es realmente buena [3].

Condiciones de exposición	Tipo de fibra	Factor de Reducción C_E
Exposición interior	Carbono	0,95
	Vidrio	0,75
	Aramida	0,85
Exposición exterior (puentes, muelles y garajes abiertos)	Carbono	0,85
	Vidrio	0,65
	Aramida	0,75
Entorno agresivo (plantas químicas y plantas de tratamiento de aguas residuales)	Carbono	0,85
	Vidrio	0,50
	Aramida	0,70

Tabla 5.1: Factores de reducción por el entorno de sistema de PRF [3].

5.2.1.4 Propiedades de los materiales para el diseño

Por lo general, las propiedades del material suministrado por la empresa como la resistencia a tracción última, no consideran la exposición a largo plazo o las condiciones del entorno y éstas deben ser consideradas como propiedades iniciales. Debido a que la exposición a largo plazo y a varios tipos de entorno puede reducir las propiedades mecánicas y la resistencia a la fatiga y fluencia de los laminados compuestos, las propiedades mecánicas aplicadas en las ecuaciones de diseño deben incluir el coeficiente reductor en función del entorno. Las ecuaciones proporcionan las propiedades mecánicas que deben ser utilizadas en todas las ecuaciones de cálculo. La resistencia última debe

determinarse aplicando el coeficiente reductor de la Tabla 5.1 para la fibra y la condición de exposición [3]:

$$f_{fu} = C_E \cdot f_{fu}^* \quad (5.3)$$

Similarmente, el valor de la deformación específica ε también debe reducirse en función de las condiciones del entorno:

$$\varepsilon_{fu} = C_E \cdot \varepsilon_{fu} \quad (5.4)$$

Como todos los materiales compuestos son elásticos linealmente hasta la rotura, el cálculo del módulo de elasticidad puede determinarse por la ley de Hooke. La expresión para el módulo de elasticidad reconoce que el módulo, normalmente, no es afectado por las condiciones del entorno. En este caso, el módulo tomado para esta ecuación tendrá el mismo valor que el inicial aportado por la empresa [3]:

$$E_f = f_{fu} / \varepsilon_{fu} \quad (5.5)$$

5.2.2 Boletín 14 de la FIB

5.2.2.1 Requerimientos del diseño

El procedimiento de diseño debe consistir en la verificación de ambos estados límites, el de servicio (ELS) y el estado límite último (ELU). Deben considerarse las siguientes situaciones de diseño [1]:

- Situación de servicio, uso normal de la estructura.
- Situación accidental, en la que se pierde la capacidad del refuerzo de tomar cargas (impactos, vandalismo, fuego, etc).
- Consideraciones especiales de diseño, tensiones en el adhesivo debido a diferencias en el coeficiente de expansión térmica, resistencia al fuego.

5.2.2.2 Verificación del estado límite de servicio (ELS)

Debe ser demostrado que el elemento reforzado o la estructura trabajan correctamente en condiciones normales. Para este requerimiento se verifica lo siguiente [1]:

- Tensiones; deben ser limitadas para poder anticipar la fluencia del acero, daños o excesivo desprendimiento del hormigón y excesivo deslizamiento o rotura del refuerzo de PRF.
- Deformaciones o retracciones que puedan restringir el uso normal de la estructura. Producen daños en elementos no vinculados con las cargas o influyen negativamente en la estética.
- Aplastamiento (incluso aplastamiento en la interface del adhesivo); puede dañar la durabilidad, funcionalidad y aspecto de la estructura o puede poner en peligro la integridad de la interface del adhesivo entre el hormigón y el refuerzo de PRF.

Si el objetivo del refuerzo está relacionado con la mejora de la capacidad de servicio, los ELS se tomarán como prioridad en el diseño, por encima de los ELU. Incluso si el objetivo del refuerzo es el incremento de la resistencia, es prioridad en el diseño el ELS para elementos sometidos a flexión. Es más, como los materiales de PRF tienen elevada resistencia, se necesitarán secciones más pequeñas de PRFC para el ELU, que pueden ser insuficientes para alcanzar los criterios de servicio [1].

Para las verificaciones en ELS se considera una respuesta tensión-deformación lineal para los materiales constituyentes y los factores parciales de seguridad de los materiales se toman igual a 1. Para las combinaciones de carga se aplica el Eurocódigo 2. En el caso del PRF, se tomará de la siguiente relación (5.6) [1]:

$$\sigma_f = E_{fk} \cdot \varepsilon_f \quad (5.6)$$

En donde E_{fk} es el módulo de elasticidad y se determina entre el 10% y 50% de la resistencia última del PRF.

5.2.2.3 Verificación del estado límite último (ELU)

En el ELU se deben considerar los diferentes tipos de rotura que pueden suceder. En general pueden ser divididos entre aquellos que suponen un comportamiento correcto entre el hormigón y el sistema de PRF y aquellos que verifican los distintos mecanismos de despegue del PRF que pueden ocurrir (falla del adhesivo) [1].

Los coeficientes de seguridad de las acciones y los materiales que se toman en el cálculo corresponden a los aplicados en el Eurocódigo 2. El diseño de la situación

accidental es una verificación en el que se supone la pérdida del refuerzo debido al impacto, vandalismo o incendio. El elemento sin reforzar se somete a todas las combinaciones de carga accidentales del elemento reforzado. Esta verificación se realiza en estado límite último, considerando el factor parcial de seguridad para los materiales igual a 1 y considerando los coeficientes reductores de seguridad y combinación de cargas como aparecen en el Eurocódigo 1, parte 1.

Las condiciones ambientales deben ser tenidas en cuenta en el inicio del proceso de diseño, de modo que su influencia con respecto a la durabilidad es considerada solo si es necesario tomar medidas de protección.

Verificación del ELU. Comportamiento del hormigón y PRF

Para la verificación de los ELU, se hace referencia al diseño de las curvas tensión-deformación de los materiales constituyentes:

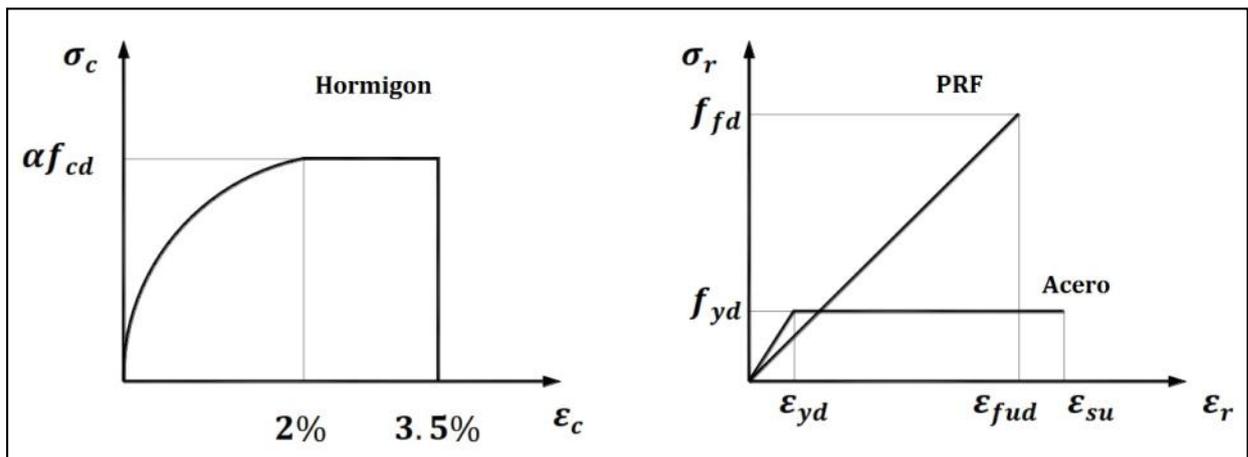


Figura 5.2: Curvas tensión-deformación de los materiales constituyentes en ELU [1].

Los valores de los coeficientes de seguridad para el hormigón y acero se toman del Eurocódigo 2. Para el hormigón corresponde 1,50 y para el acero 1,15. El comportamiento tensión-deformación de un PRF en la verificación ELU puede ser idealizada por medio de una respuesta lineal, definida en la siguiente ecuación (5.7) [1]:

$$\sigma_f = E_{fu} \cdot \varepsilon_f \leq f_{fd} \quad (5.7)$$

Donde E_{fu} es el módulo de elasticidad último.

Cuando el diseño se rige por ELS o un ELU correspondiente al aplastamiento del hormigón o falla del adhesivo, la deformación del PRF en estado último es bastante limitada. En esta situación, que es frecuente, la tensión del PRF en ELU es

considerablemente inferior que su resistencia última, es por eso que generalmente la resistencia última de diseño no es gobernante. Para verificar esto o en los casos donde el ELU es determinado por la falla a tracción del PRF, se hace referencia a la resistencia en el cálculo f_{fd} (5.8) [1]:

$$f_{fd} = \frac{f_{kd}}{\gamma_{fd}} \cdot \frac{\varepsilon_{fue}}{\varepsilon_{fum}} \quad (5.8)$$

En la tabla 5.3 se sugieren los valores para el factor de seguridad del material de PRF:

Tipo de PRF	Aplicación Tipo A	Aplicación Tipo B
PRFC	1,20	1,35
PRFA	1,25	1,45
PRFV	1,30	1,50

Tabla 5.3: Factores de seguridad para el material de PRF [1].

- Aplicación Tipo A: para sistemas laminados EBR bajo condiciones normales de control de calidad y sistemas de tejido si se toman las medidas necesarias para obtener un grado alto de control de calidad tanto en condiciones de aplicación como de instalación.
- Aplicación Tipo B: para sistemas de tejido en condiciones normales de control de calidad y aplicación de cualquier sistema bajo condiciones difíciles de trabajo.

Verificación del ELU por falla del adhesivo

Asumiendo una aplicación adecuada del PRF y el uso correcto de los materiales, la falla de la unión sucederá en el hormigón. En ELU se hará referencia a la resistencia a tracción y corte del hormigón con un coeficiente de seguridad tomado del Eurocódigo 2 e igual a 1,5 [1].

El principal tipo de falla de un elemento a flexión será o la fluencia del acero - aplastamiento del hormigón (antes de la rotura del PRF o su despegue) correspondiente con la zona B de la Figura 5.4, o bien la fluencia del acero - falla del PRF (rotura o fallo del adhesivo), correspondiente con la zona A de la Figura 5.4. Esta corresponde a la distribución de deformaciones en ELU donde ε_0 es la deformación inicial de la fibra externa antes del refuerzo, $\varepsilon_{f,min}$ es la deformación mínima admisible del PRF en estado límite último y $\varepsilon_{fu,c}$ es la deformación del PRF en la sección crítica en estado último. En caso de que la rotura del adhesivo sea el principal, el valor de $\varepsilon_{fu,c}$ es igual a valor de

diseño de la deformación última del PRF. En caso de falla del adhesivo, el valor de $\varepsilon_{fu,c}$ es igual a la deformación del PRF en la sección crítica cuando esta se despega [1].

Para elementos a flexión muchas veces el diseño queda determinado por el ELS. Esto implica que serán aplicadas mayores cantidades de PRF que las necesarias en ELU. Esto influirá positivamente en la relación de la carga última y la carga de servicio [1].

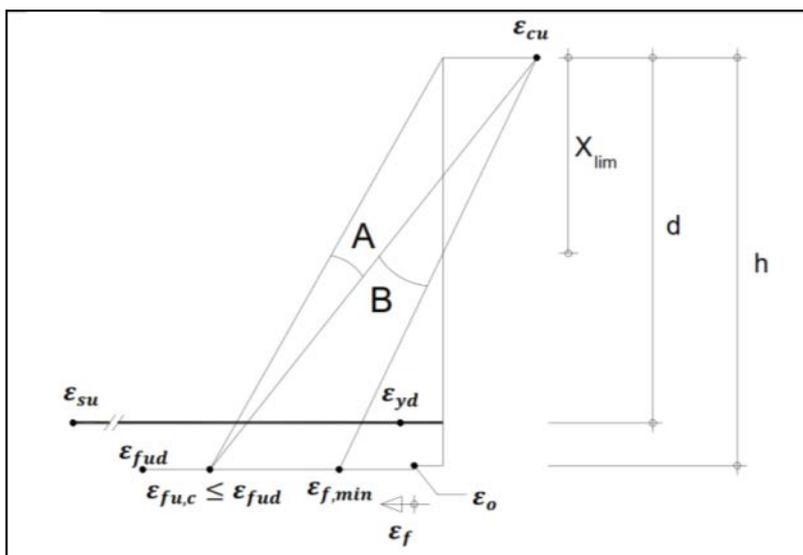


Figura 5.4: Deformaciones en ELU de la sección crítica de un miembro reforzado a flexión [1].

5.2.3 Comparación entre la ACI - FIB

La guía ACI propone un diseño basado en los principios de los estados límite, que establecen niveles de seguridad en estados límite último ELU y estados límite de servicio ELS. La resistencia de un elemento se hace con las posibles formas de falla y los consecuentes esfuerzos y tensiones en cada material, con la aplicación de los coeficientes de minoración que aparecen en la guía ACI 318.

Esta guía establece que la estructura existente debe soportar sin aplicar el refuerzo un nivel de carga aceptable de forma que esto ya es un criterio para el cálculo de esta resistencia. En el caso de incendios, donde da por perdidas las propiedades del refuerzo, establece un criterio de cálculo para estimar la resistencia del elemento para ser reforzado con un PRF. Los coeficientes para este cálculo se toman de la guía ACI 216R [3].

En función de las condiciones del entorno donde va a ser aplicado el refuerzo, establece un coeficiente de minoración de la resistencia y deformación de la fibra de carbono, además indica que puede aplicarse un revestimiento a los refuerzos para

protegerlos del entorno. Por otro lado, la FIB aplica un coeficiente de minoración de la resistencia de la fibra para su cálculo en el diseño. Tanto en ACI como en FIB, es válido el comportamiento lineal tensión-deformación de los FRP hasta la rotura.

La FIB exige la verificación de los dos estados, el límite último y el de servicio, estableciendo como prioritario al ELS sobre el ELU en los casos de refuerzo para el incremento en la resistencia del elemento y mejora de la capacidad de servicio. Como se dijo, se establece un coeficiente de minoración de la resistencia en función del tipo de refuerzo. Se aplican en todos los casos los coeficientes sobre acciones y materiales que aparecen en el Eurocódigo 2. En el apartado de la verificación en ELU, se divide en dos grupos en función del tipo de falla: comportamiento correcto hormigón-PRFC y falla del adhesivo. De este modo, establece los criterios de cálculo para cada verificación [1].

En resumen, los coeficientes de seguridad de las acciones y materiales propuestos por estas guías para el cálculo no son los mismos y provienen de diferentes directrices, según la FIB del Eurocódigo 2 y el ACI lo toma de otro apartado también perteneciente al ACI 318. Pero tanto en ACI como en la FIB, el cálculo debe basarse en ambos estados límites último y de servicio.

Como resultado de la introducción al cálculo, se observa que el método ACI formula dos criterios, uno de resistencia estructural y al fuego, que debe cumplir la estructura existente antes de aplicar el refuerzo, y un criterio con un coeficiente de minoración de las propiedades del refuerzo en función del ambiente al que va a ser expuesto. Esto no aparece en la guía FIB, donde se nos orienta directamente a la comprobación de los estados ELS y ELU, con este último separado en dos procedimientos en función del tipo de falla, y donde establece un factor de minoración de la resistencia en función de la fibra de refuerzo a utilizar y la forma de utilizarla.

5.3 Criterios para el refuerzo a flexión de vigas. ACI 440

5.3.1 Introducción

En esta sección se presenta la guía de cálculo del ACI 440 [3] de un refuerzo a flexión con un refuerzo longitudinal de PRFC en la cara traccionada de la viga. Este refuerzo puede proporcionar un aumento en la resistencia a flexión de entre el 5 y 40%. Se dará una visión general de los conceptos tomando como base una viga de sección rectangular existente reforzada en su cara traccionada, pero también se aplicara el concepto a secciones no rectangulares I o T y a elementos con armadura de acero trabajando a compresión. Ya no se hará referencia al material como PRF sino que especificaremos el tipo de refuerzo con polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC), aunque las mismas consideraciones valen para fibras de aramida y fibra de vidrio.

No se volverá a hacer referencia a esta guía [3] ya que a partir de este punto el resto de este capítulo fue extraído de la misma.

5.3.2 Hipótesis de diseño

- Los cálculos para el diseño se basan en las dimensiones reales, disposición de la armadura interna y en las propiedades del material existente bajo carga.
- Las tensiones en el hormigón y en el refuerzo son directamente proporcionales a la distancia al eje neutro, es decir, se mantiene la hipótesis de Navier - Bernoulli de las secciones planas.
- El refuerzo externo de PRFC está perfectamente adherido al hormigón. No existe deslizamiento entre el refuerzo y el hormigón.
- La deformación de corte del adhesivo es despreciable ya que esta capa es muy delgada con muy pocas variaciones en su espesor.
- La máxima deformación específica admitida para el hormigón es del 3‰.
- No es considerada para el cálculo la resistencia a tracción del hormigón.
- El refuerzo de PRFC tiene un comportamiento elástico lineal de tensiones y deformaciones hasta la rotura.

Cuando un refuerzo de PRFC está siendo aplicado para incrementar la resistencia a flexión de un elemento, es muy importante verificar que el elemento será capaz de resistir los esfuerzos cortantes asociados con el incremento de la resistencia a flexión. Este es un tema importante a tener en cuenta al momento de realizar el diseño del refuerzo de una sección a flexión ya que es necesario determinar si el elemento es capaz de resistir esta fuerza de corte asociada al incremento de las solicitaciones a flexión. De lo contrario se requeriría disponer un refuerzo adicional de manera transversal para reforzar el corte.

A menos que todas las cargas sobre un elemento sean eliminadas antes de la instalación del refuerzo, el sustrato al cual el PRFC será aplicado estará deformado. Estas deformaciones deben ser consideradas como deformaciones iniciales y deben ser excluidas de la deformación en el PRFC. El nivel de deformación inicial puede ser determinado a partir de un análisis elástico del elemento existente, considerando todas las cargas que actúan sobre el elemento durante la instalación del sistema con expresión (5.9):

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{dl} \cdot (h - kd)}{I_{cr} \cdot E_c} \quad (5.9)$$

5.3.3 Resistencia nominal

El método de diseño de resistencia a flexión requiere verificar que el momento de diseño a flexión $M_d = \phi \cdot M_n$ sea mayor que el momento ultimo a flexión M_u , como lo indica la ecuación (5.10). El momento de diseño M_d es la resistencia nominal del elemento estructural multiplicado por un factor de reducción ϕ , mientras que la resistencia ultima a flexión M_u es igual al momento requerido M_r y se determina teniendo en cuenta las cargas mayoradas, como se describe en el ACI 318.

$$\phi \cdot M_n \geq M_u \quad (5.10)$$

Además del coeficiente de minoración de resistencia ϕ , se debe aplicar un factor de reducción adicional ψ_f para la contribución a flexión del PRFC. La capacidad que tiene un elemento estructural con PRFC a flexión puede determinarse aplicando la compatibilidad de deformaciones, el equilibrio interno de fuerzas y el control del tipo de rotura.

5.3.4 Tipos de falla según la ACI

La resistencia a flexión de una sección depende del control del tipo de rotura. Se deben investigar los siguientes:

- Aplastamiento del hormigón a compresión antes de alcanzar el límite elástico del acero.
- Alcance del límite elástico del acero seguido por la rotura de la lámina de PRFC.
- Alcance del límite elástico del acero seguido por el aplastamiento del hormigón.
- Delaminación por corte o flexión del recubrimiento de hormigón.
- Despegue del PRFC del sustrato de hormigón.

El aplastamiento del hormigón se producirá si la tensión a compresión en el hormigón alcanza su valor máximo ($\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,003$). La rotura del laminado ocurrirá si la tensión en el PRFC alcanza su tensión de rotura ($\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$) antes de que el hormigón alcance su tensión máxima.

La delaminación del recubrimiento de hormigón o el despegue del PRFC ocurrirá si la fuerza aplicada en el PRFC no se puede sostener por el sustrato. Para prevenir el despegue del laminado de PRFC se debe limitar el nivel de deformación desarrollada en el laminado para el cual se puede producir el desprendimiento con la ecuación (5.11):

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,90 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (5.11)$$

Expresado en unidades del SI, "n" es la cantidad de laminados en el punto donde se calcula la deformación.

5.3.5 Nivel de deformación en el refuerzo de PRFC

Debido a que los materiales PRFC son linealmente elásticos hasta la rotura, el nivel de deformación dictará el nivel de tensión desarrollado en los mismos. El máximo nivel de deformación que se puede lograr en un refuerzo PRFC se regirá por el nivel de deformación desarrollado en el mismo en el punto donde el hormigón se fisura, el punto donde rompe el PRFC o el punto donde se despegue de la superficie. La deformación efectiva en el refuerzo en el ELU es dada por la ecuación (5.12):

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (5.12)$$

donde ε_{bi} es la deformación inicial del sustrato.

Nivel de tensión en el refuerzo de PRFC

El nivel de tensión eficaz en el refuerzo es el máximo nivel de tensión que puede desarrollarse en el refuerzo antes de la falla por flexión de la sección. Esta tensión eficaz puede encontrarse en el nivel de deformación del PRFC, suponiendo un comportamiento elástico perfecto.

5.3.6 Factor de reducción de resistencia

El uso de un sistema de PRFC adherido externamente para el refuerzo a flexión reducirá la ductilidad del elemento original. En algunos casos, la pérdida de ductilidad es insignificante. No obstante, se les debe prestar especial atención a las secciones que experimentan una pérdida representativa de ésta. Para mantener un grado suficiente de ductilidad, se debe verificar el nivel de deformación del acero en el estado límite último. La ductilidad es adecuada si la deformación del acero en el punto de aplastamiento del hormigón o de la falla del PRFC, incluyendo delaminación o desprendimiento, alcanza un valor de al menos 0,005.

Este enfoque sigue la filosofía del ACI 318 Apéndice B, donde una sección con baja ductilidad debe ser compensada con una alta reserva de resistencia. La mayor reserva de resistencia es lograda mediante la aplicación de un factor de reducción de resistencia de 0,65 a las secciones frágiles, en oposición a 0,90 para secciones dúctiles. Por lo tanto, debe utilizarse un factor de reducción de resistencia dado por las expresiones siguientes (5.13), donde ε_t es la deformación del acero en el estado límite último:

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{para } \varepsilon_t \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_{sy})}{0,005 - \varepsilon_{sy}} & \text{para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_t < 0,005 \\ 0,65 & \text{para } \varepsilon_t \leq \varepsilon_{sy} \end{cases} \quad (5.13)$$

Esta ecuación fija el factor de reducción en 0,90 para secciones dúctiles y 0,65 para secciones frágiles donde el acero no alcanza la deformación del límite elástico, y proporciona una transición lineal para el factor entre estos dos extremos:

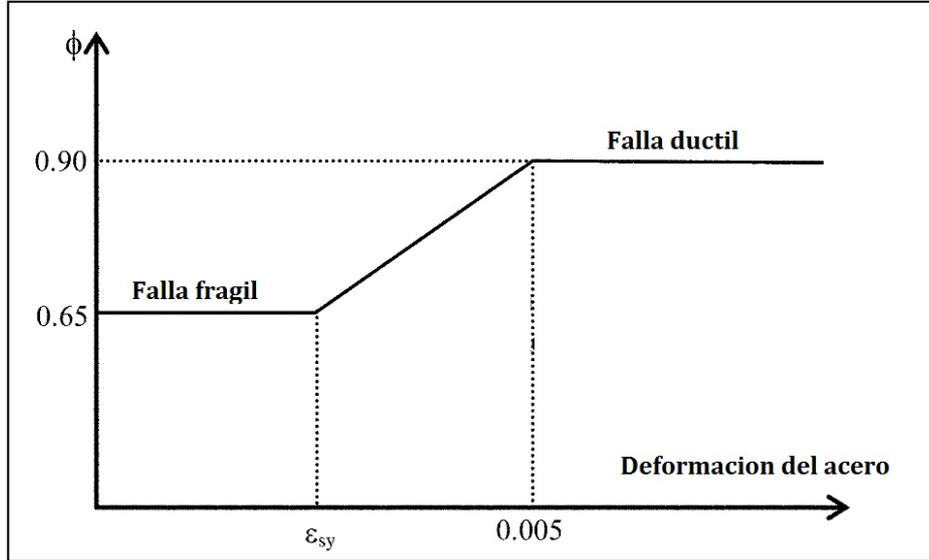


Figura 5.5: Variación del coeficiente reductor de resistencia en función del tipo de falla [3].

5.3.7 Capacidad de servicio

La serviciabilidad de un elemento estructural (deflexiones, anchos de fisura) bajo cargas de servicio debe satisfacer las disposiciones del ACI 318. Para evitar deformaciones inelásticas de los miembros de hormigón reforzados con PRFC debe impedirse superar el 80% del límite elástico en el acero interno existente bajo cargas de servicio, y la tensión a compresión en el hormigón bajo cargas de servicio se debe limitar al 45% de la resistencia a rotura, como se muestra a continuación con las ecuaciones (5.14) y (5.15):

$$f_{s,s} \leq 0,80 \cdot f_y \quad (5.14)$$

$$f_{c,s} \leq 0,45 \cdot f'_c \quad (5.15)$$

5.3.8 Aplicación a una sección rectangular reforzada

Resistencia última

La siguiente Figura 5.6 refleja la distribución interna de tensiones y deformaciones de una sección rectangular a flexión en estado límite último:

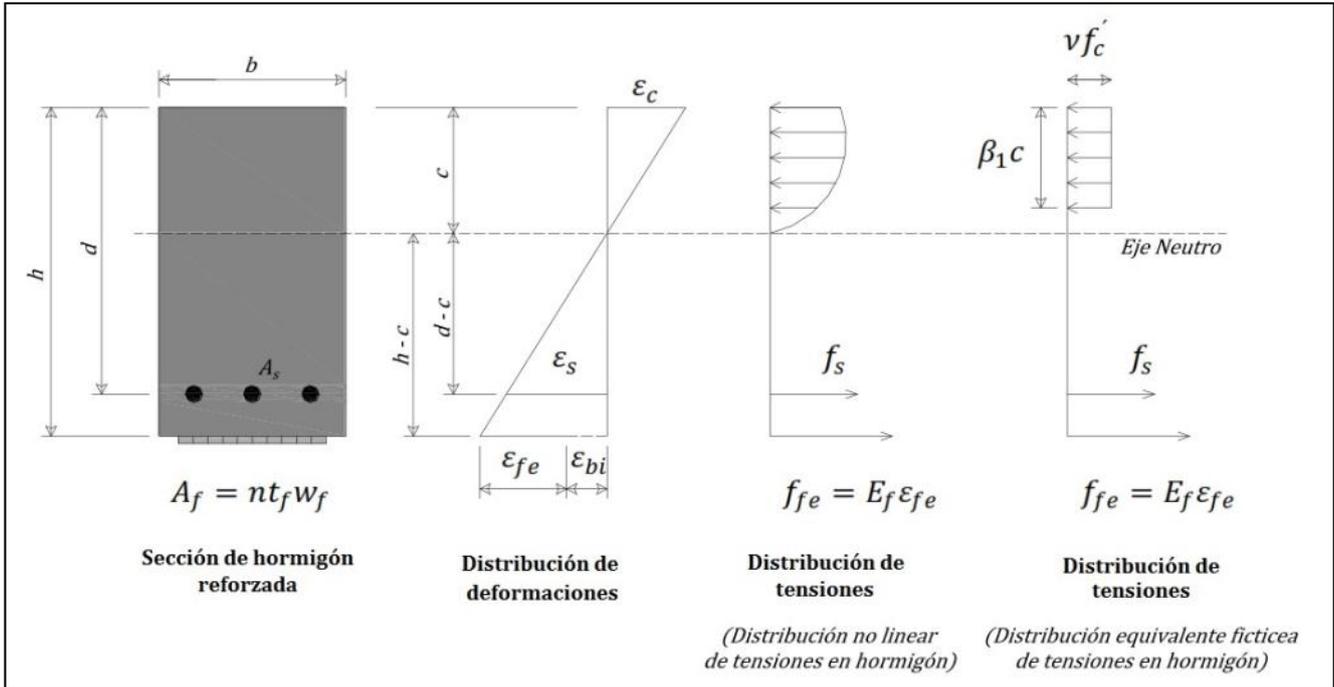


Figura 5.6: Distribución interna de tensiones y deformaciones de una sección rect. a flexión en ELU [3].

El procedimiento de cálculo utilizado para llegar a la resistencia de diseño debe satisfacer la compatibilidad de deformaciones y equilibrio de fuerzas y considerar el tipo de falla.

Este es un procedimiento de prueba y error que implica seleccionar una profundidad supuesta del eje neutro “c”, calcular el nivel de deformación en cada material aplicando la compatibilidad de deformaciones, luego comprobar el equilibrio de las fuerzas internas y ver si se encuentran en equilibrio. Si las resultantes de fuerzas internas no están en equilibrio, se debe revisar la profundidad del eje neutro y repetir el proceso.

Para una supuesta profundidad del eje neutro, el nivel de deformación del PRFC puede calcularse de la ecuación (5.12). Esta ecuación considera el tipo de falla principal para la supuesta profundidad del eje neutro. Si domina el primer término, el aplastamiento del hormigón controla la rotura a flexión de la sección. Si domina el segundo término, la falla del PRFC (rotura o despegue) controla la rotura a flexión de la sección. Se recuerda la ecuación (5.12):

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \cdot \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd} \quad (5.12)$$

El nivel de deformación eficiente en el refuerzo se puede encontrar a partir del nivel de deformación del mismo, suponiendo un comportamiento elástico perfecto:

$$f_{fe} = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \quad (5.16)$$

En base al nivel de deformación del PRFC se puede calcular la deformación del acero mediante la compatibilidad de deformaciones con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \cdot \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right) \quad (5.17)$$

La tensión en el acero se calcula a partir del nivel de deformación del mismo, suponiendo un comportamiento elasto-plástico.

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y \quad (5.18)$$

Una vez determinados los niveles de tensión y deformación en acero y PRFC para una supuesta profundidad del eje neutro, el equilibrio de fuerzas internas se debe comprobar con la ecuación (5.19):

$$c = \frac{A_s \cdot f_s + A_f \cdot f_{fe}}{\alpha_1 \cdot f'_c \cdot \beta_1 \cdot b} \quad (5.19)$$

Donde los coeficientes α_1 y β_1 se toman de la guía ACI 318, para todos los tipos de rotura.

La resistencia nominal a flexión de la sección con refuerzo de PRFC se calcula con la ecuación (5.20), donde se aplican el coeficiente reductor de resistencia ϕ y el factor adicional de reducción ψ_f a la contribución del PRFC en el refuerzo a flexión ($\psi_f = 0,85$):

$$M_n = A_s \cdot f_s \cdot \left(d \cdot \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h \cdot \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \quad (5.20)$$

Tensión en el acero bajo cargas de servicio

Mediante un análisis elástico de fisuración en la sección de hormigón reforzada se puede calcular la tensión en el acero con la siguiente expresión:

$$f_{s,s} = \frac{M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) \cdot (d - kd) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot \left(d - \frac{kd}{3} \right) \cdot (d - kd) + A_f \cdot E_f \cdot \left(d_f - \frac{kd}{3} \right) \cdot (d - kd)} \quad (5.21)$$

La tensión en el acero bajo debe ser comparada con los límites descritos anteriormente en el apartado sobre capacidad de servicio, en donde:

$$f_{s,s} \leq 0,80 \cdot f_y \quad (5.22)$$

5.3.9 Conclusiones del ACI

El ACI parte de la base del estudio de una viga de sección rectangular reforzada en su cara traccionada mediante la aplicación de un refuerzo de PRFC. Asume una serie de hipótesis para facilitar el cálculo, que incluso no reflejan el comportamiento real del refuerzo. Como se ya ha dicho, el ACI comenta que el incremento de esfuerzos a flexión de la viga originará el incremento también del corte, y que en caso de que el miembro presente ya una deformación, ésta debe ser considerada como la inicial en el cálculo. Estos datos deben tenerse en cuenta en el momento del diseño.

Se establece un criterio de resistencia a aplicar en el diseño a flexión, donde el momento de diseño, con coeficiente de minoración, debe ser mayor que el momento requerido. La determinación se hace mediante la compatibilidad de deformaciones, equilibrio interno de fuerzas y control del tipo de rotura. Todos los coeficientes sobre las acciones son tomados del ACI 318.

La resistencia a flexión de una sección depende del control del tipo de rotura. ACI plantea cinco tipos de falla que deben ser analizados. Para evitar el caso concreto de rotura por despegue del laminado o delaminación del recubrimiento, el ACI plantea una limitación de la deformación del refuerzo para prevenir este despegue que debe ser tomada en el cálculo.

La guía ACI establece el comportamiento linealmente elástico hasta la falla de los PRFC, de ahí que la exigencia en los niveles de tensión y deformación de los sistemas serán dependientes el uno del otro de este comportamiento y, en particular, el nivel de deformación determinará el nivel de tensión.

El refuerzo de PRFC reduce la ductilidad del elemento, que también depende de la deformación de acero. El criterio del ACI es que la baja ductilidad debe ser compensada por una reserva de resistencia y por este hecho establece un coeficiente que reduce en mayor grado la resistencia a las secciones frágiles que las dúctiles, de forma que va a exigir una mayor reserva de resistencia en las primeras. En relación a la capacidad de servicio, ACI limita la tensión del acero al 80% de su límite elástico.

Por último se establece un procedimiento para el cálculo del refuerzo a flexión de vigas de sección rectangular en ELU, con el cálculo de la resistencia última, el cálculo en base a una supuesta profundidad del eje neutro (área comprimida), la compatibilidad de

deformaciones, nivel de deformación asociado a cada material, equilibrio de fuerzas y la resistencia a flexión nominal de la sección reforzada. En este punto, el ACI establece la aplicación de un coeficiente reductor adicional $\psi_f = 0,85$. Posteriormente, se comprueba la tensión en el acero en ELS.

En caso de no cumplir cualquiera de los requisitos, se debe revisar la profundidad del eje neutro y volver a realizar el cálculo. Todos los coeficientes aplicables a la formulación se toman del apartado ACI 318.

En base a este análisis se puede resumir el procedimiento de diseño como sigue:

- Analizar el comportamiento de la estructura sin reforzar. En caso de no cumplir los requerimientos de cargas, plantear propuestas de refuerzo mediante sistema PRFC.
- Comprobar que el nivel de resistencia del elemento a reforzar satisface los criterios iniciales de límite de resistencia y resistencia contra el fuego.
- Calcular las propiedades resistentes y de deformación de cálculo del sistema PRFC, aplicando el coeficiente reductor en función del entorno.
- Determinar las propiedades del hormigón, acero y PRFC.
- Determinar el estado de la deformación del elemento existente.
- Determinar el coeficiente de dependencia del adhesivo del sistema PRFC.
- Estimar la profundidad del eje neutro “ c ” (Un valor razonable corresponde a $0,20 \cdot d$).
- Determinar el nivel de deformación eficaz en el refuerzo.
- Calcular la deformación del acero existente.
- Calcular el nivel de tensión en el acero y el PRFC.
- Calcular las resultantes de fuerzas internas y comprobar el equilibrio.
- Ajustar el valor de c hasta que se satisfaga el equilibrio de fuerzas. Repetir los pasos con diferentes valores de c hasta conseguir el equilibrio de fuerzas.
- Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección.
- Comprobar las tensiones en servicio del acero y PRFC (sólo casos de cargas cíclicas).

5.4 Criterios para el refuerzo a corte de vigas. ACI 440

5.4.1 Consideraciones generales

Los sistemas de PRFC han demostrado que pueden aumentar la resistencia a esfuerzos de corte en vigas de hormigón armado existentes mediante un encamisado total o parcial y que orientar las fibras transversales al eje del elemento o bien perpendicular a las grietas potenciales de corte es muy eficiente para dicho propósito. En el refuerzo externo en forma de laminados, la separación eje a eje entre láminas no debe superar la distancia de $d/4$ más el ancho de la cinta.

5.4.2 Esquemas de revestimiento

En la siguiente Figura 5.7 se muestran los tres tipos de revestimientos de PRFC utilizados para aumentar la resistencia a corte de vigas:

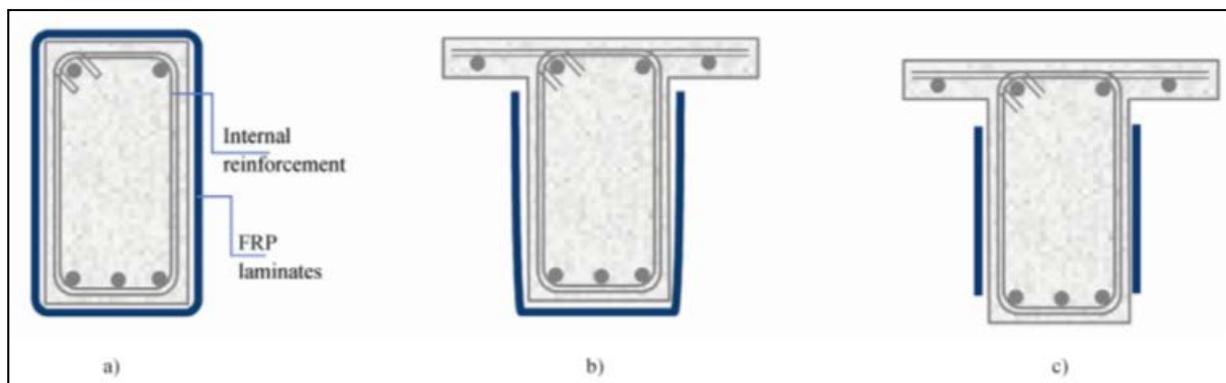


Tabla 5.7: Esquemas típicos de envoltura para refuerzo a corte aplicando laminados de PRFC [25].

- a) Encamisado completo.
- b) Encamisado en tres caras, en forma de "U".
- c) Encamisado en caras laterales.

El encamisado completo es el esquema más efectivo y el más aplicado en columnas, dado que es fácil acceder a sus cuatro caras. En aplicaciones en vigas, donde la losa impide la envoltura completa, se puede realizar con la envoltura alrededor de tres caras, en forma de U, o el pegado en los dos laterales del elemento estructural [22].

Las tres técnicas han demostrado mejorar la resistencia a corte, aunque el sistema más eficiente es el encamisado completo de la sección, donde el tipo de falla más probable

es la rotura del PRFC, seguido del encamisado en U, con una gran probabilidad de falla por desprendimiento del PRFC. De la misma manera pasa con el pegado en los laterales solamente, siendo el esquema menos eficiente [22].

5.4.3 Resistencia nominal a corte

La resistencia de diseño a corte de un elemento de hormigón armado reforzado con PRFC debe ser superior a la resistencia requerida para el corte. Esta resistencia requerida a corte se determina con los coeficientes de cargas al igual que en el ACI 318 y con el factor de minoración de resistencia a corte ϕ :

$$\phi \cdot V_n \geq V_u \quad (5.23)$$

La resistencia nominal a corte de un elemento de hormigón reforzado con PRFC puede determinarse agregando la contribución del refuerzo a las propias del acero y del hormigón. En la ecuación (5.24) se agrega un factor de reducción adicional ψ se aplica a la contribución del sistema de PRFC.

$$\phi \cdot V_n = \phi \cdot (V_c + V_s + \psi \cdot V_f) \quad (5.24)$$

Donde:

$\psi = 0,95$ para vigas con encamisado completo.

$\psi = 0,85$ para envoltura en forma de U o en caras laterales.

5.4.4 Contribución del sistema de PRFC al corte

En la siguiente Figura 5.8 se observan las variables utilizadas en los cálculos a corte de los laminados de PRFC.

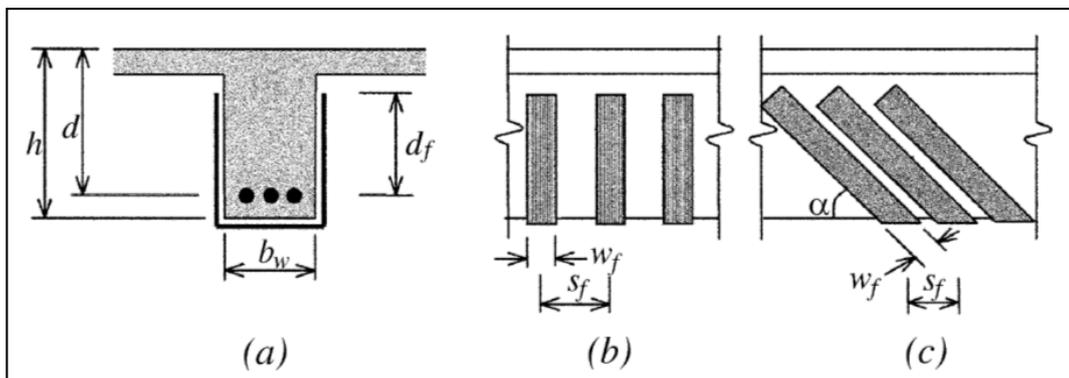


Figura 5.8: Ilustración de las variables disposiciones utilizadas en el cálculo del refuerzo a corte utilizando laminados de PRFC [3].

La resistencia al corte proporcionado por el refuerzo puede determinarse con la fuerza resultante de tracción en el refuerzo donde está la grieta supuesta con la siguiente ecuación:

$$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot d_{fv}}{s_f} \quad (5.25)$$

Donde:

$$A_{fv} = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \quad (5.26)$$

El esfuerzo a tracción en estado último en el refuerzo de PRFC a corte es directamente proporcional al nivel de deformación que puede desarrollarse en el refuerzo a corte en estado último:

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} \cdot E_f \quad (5.27)$$

5.4.4.1 Deformación efectiva en laminados de PRFC

La deformación efectiva es la máxima que se puede alcanzar en un sistema de PRFC en el estado último de carga y está gobernada por el tipo de falla del sistema y del elemento reforzado de hormigón. El técnico debe considerar todos los posibles tipos de rotura y utilizar una deformación efectiva representativa del tipo de falla crítica. Los siguientes sub-apartados buscan orientar en la determinación de la deformación efectiva para diferentes configuraciones de laminados utilizados para el refuerzo a corte de elementos de hormigón.

- Miembros encamisados completamente

Se limita la deformación máxima de diseño del refuerzo de PRFC al 4‰:

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (5.28)$$

Esta limitación de la deformación está basada en ensayos y en la experiencia. Deformaciones mayores no deben ser utilizadas para aplicaciones de refuerzo de corte de este tipo.

- Pegado en U o en caras laterales

Las tensiones del adhesivo deben analizarse para determinar la utilidad de estos sistemas y el nivel de deformación efectiva que puede alcanzarse. Esta deformación efectiva se calcula aplicando un coeficiente reductor de unión k_v en el corte:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (5.29)$$

Este coeficiente k_v , es una función de la resistencia del hormigón, el esquema de envoltura utilizado y la rigidez del laminado. Puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$k_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot L_e}{11\,900 \cdot \varepsilon_{fu}} \leq 0,75 \quad (5.30)$$

La longitud activa de la unión L_e es la longitud sobre la que la mayoría de la tensión de pegado se produce. Esta longitud la da la ecuación (5.31):

$$L_e = \frac{23\,300}{(n_f \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}} \quad (5.31)$$

Siempre en unidades SI.

El coeficiente reductor de unión k_v también se basa en dos factores de modificación, k_1 y k_2 , en función de la resistencia del hormigón y del esquema de envoltura aplicado, respectivamente. Las expresiones para estos factores son:

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27}\right)^{2/3} \quad (5.32)$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} & \text{para refuerzos en U} \\ \frac{d_{fv} - 2 \cdot L_e}{d_{fv}} & \text{para refuerzos en los laterales} \end{cases} \quad (5.33)$$

Pueden utilizarse anclajes mecánicos en los puntos de terminación para desarrollar mejores refuerzos de tracción. La eficacia de estos anclajes y el nivel de esfuerzos de tracción que pueden desarrollar, debe estar fundamentado a través de ensayos físicos representativos. Sin embargo, la deformación efectiva del laminado nunca debe exceder del 4‰.

5.4.4.2 Espaciado

Cintas o laminados de PRFC separados utilizados para refuerzos a corte deben ser investigados para evaluar su contribución a la resistencia de corte. El espaciado debe contemplar los límites establecidos por el ACI 318 para la armadura a corte (estribos). El uso de estribos separados de PRFC debe ser validado por ensayos.

5.4.4.3 Límites de refuerzo

El refuerzo total a corte debe tomarse como la suma de la contribución del refuerzo a corte de PRFC y la armadura a corte del elemento de hormigón. La capacidad de refuerzo se limita en base a los criterios de las vigas armadas, según el ACI, Sección 11.5.6.9. Este límite se indica en la siguiente ecuación:

$$V_s + V_f \leq 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \quad (5.34)$$

5.4.5 Resumen

- Resistencia al corte:

$$\phi \cdot V_n = \phi \cdot (V_c + V_s + \psi \cdot V_f)$$
$$\psi = 0,95 \text{ o } 0,85$$

- Contribución del refuerzo de PRFC:

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

- Limite de deformación de diseño:

$$\varepsilon_{fe} \leq 0,004$$

- Separación entre laminados:

$$s_f \leq d/4 + w_f$$

- Limite de refuerzo:

$$V_s + V_f \leq 0,66 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d$$

- Coeficientes utilizados del ACI 318.

5.5 Procedimiento de cálculo con el programa utilizado por Sika

El procedimiento utilizado por los técnicos de Sika para brindar soluciones con los diferentes sistemas de PRFC, es simplemente una planilla en Excel con el procedimiento de cálculo recomendado por el comité ACI 440.

En el programa se pueden ver cargados los datos para una viga de sección rectangular de 610 mm de altura por 310 mm de ancho con la información de refuerzo y de cargas existente, propiedades de los materiales y elección del sistema de refuerzo de PRFC seleccionado. Todos estos serían los datos de entrada. Luego el programa realiza las verificaciones correspondientes:

DATOS DE ENTRADA: INFORMACION DE LA ESTRUCTURA EXISTENTE

Geometría de la Sección

$h =$	610	mm
$b =$	310	mm
$b_w =$	310	mm
$h_f =$	0	mm
	NO	

Altura de la sección

Ancho de la losa o viga rectangular

Ancho del alma de la viga T ($b_w = b$ para secciones rectangulares, $b_w < b$ para secciones en T)

Espesor de la losa superior de la viga T ($h_f = 0$ para secciones rectangulares)

Está la sección fisurada en el momento de la instalación del FRP? (Cargas en el pasado u otras razones). Introduzca "YES" or "NO". Si "YES" es introducido, los chequeos $M_i > M_{cr}$ (línea 214) y $M_s > M_{cr}$ (línea 432) no se realizan y la sección es considerada fisurada automáticamente.

Información del acero existente

$A_s =$	1924	mm ²
$d =$	546	mm
$A_s =$	0	mm ²
$d' =$	546	mm
$A_p =$	0	mm ²
$d_p =$	546	mm

Area del acero a tracción

Profundidad efectiva del acero a tracción

Area del acero a compresión (introduzca "0" si no hay acero a compresión)

Profundidad efectiva del acero a compresión (entre el valor de d si no hay acero a compresión)

Area del acero tensionado adherido* (introduzca "0" si no hay acero tensionado)

Profundidad efectiva del acero tensionado (entre el valor de d si no hay acero tensionado)

* Las aplicaciones no adheridas están por fuera del alcance de este documento

Información de las cargas

$M_D =$	98	kN-m
$M_i =$	98	kN-m
$M_L =$	176	kN-m
	NO	

Momento total de carga muerta sin mayorar que será resistido por el elemento a reforzar

Momento total sin mayorar actuando en el elemento antes del reforzamiento (usualmente el mismo M_D)

Momento total de carga viva sin mayorar (incluida la carga cíclica) que será resistido por el miembro a reforzar

Se espera sostener la carga viva? (depósitos y otras aplicaciones similares). Introduzca "YES" o "NO".

Si "YES" es introducido se hará el chequeo $\phi M_n > 1.1M_D + 1.0 M_L$. Si "NO" es introducido, se hará el chequeo $\phi M_n > 1.1M_D + 0.75 M_L$.

Propiedades de los materiales de la sección

$f_y =$	414	MPa
$E_s =$	200000	MPa
$f'_c =$	34.5	MPa
$f_{pu} =$	1860	MPa
$f_{py} =$	1690	MPa
$f_{pe} =$	1138	MPa
$E_p =$	196500	MPa

Esfuerzo de fluencia del acero

Módulo de elasticidad del acero

Esfuerzo a compresión del concreto

Esfuerzo último del acero tensionado (el programa solo tiene en cuenta valores de 1720 MPa y 1860 MPa para los torones)

Esfuerzo de fluencia del acero tensionado

Esfuerzo efectivo en el acero tensionado

Módulo de elasticidad del acero tensionado

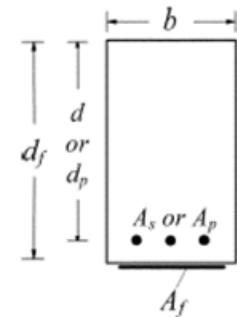


Figura 1 - Variables dimensionales usadas en los cálculos para el reforzamiento a flexión con FRP.

Propiedades del sistema FRP

Tipo de FRP

Seleccione un sistema FRP SIKA. Al seleccionar, los campos con las propiedades del material respectivas se actualizan automáticamente. Las propiedades del SikaWrap 300C se basan en pruebas con el SikaWrap Hex 117C, que tiene fibras similares y la misma matriz - contacte a Sika para más detalles.

$d_{sheet} =$ NG: bsheet=1 w/ strips!

Ancho de diseño nominal de un tejido o platina FRP. Introduzca "0" para platinas FRP

$n_{layers} =$

Número de capas de tejido (introduzca "1.00" para platinas FRP; solo se permite una capa)

$n_{sheet} =$

Escoja el número de tejidos/platinas FRP colocadas lado a lado

$n_{NSM_bars} =$

Número de barras FRP SIKA (introduzca "0" si esta no es una aplicación NSM)

$A_{NSM_bar} =$ mm²

Area de sección transversal de una barra FRP SIKA (Introduzca "0" si no es una aplicación NSM)

$f_{fu} =$ MPa

Esfuerzo a tracción último del FRP

$\epsilon_{fu} =$ mm/mm

Deformación unitaria última de rotura

$E_f =$ MPa

Módulo de elasticidad del FRP

$t_f =$ mm

Espesor de diseño nominal de un tejido o platina FRP

$b_f =$ mm

Ancho de diseño nominal de un tejido o platina FRP

$A_f =$ mm²

Area total del FRP

Ambiente

Seleccione un ambiente apropiado basado en condiciones de servicio. Al seleccionar, se actualizará automáticamente el valor del factor de reducción ambiental

$C_e =$

Factor de reducción por exposición ambiental (ACI 440.2R-08, Tabla 9.1): 0.95 para interior, 0.85 para exterior y exposición a ambientes agresivos.

$C_{cr} =$

Esfuerzo de rotura límite (Creep) (ACI 440.2R-08, Tabla 10.1; $0.20f_{fu}$ para vidrio, $0.30f_{fu}$ para arámida, $0.55f_{fu}$ para carbono)

$\Psi_f =$

Factor de reducción adicional, con base en las recomendaciones del Comité ACI 440

Variando los parámetros del FRP, el diseñador puede examinar varias configuraciones de reforzamiento y llegar a la solución de diseño óptima que satisfaga todas las condiciones.

RESUMEN DEL REFORZAMIENTO A FLEXION

Tabla 1 - Resumen de cargas de la sección sin reforzar

ΦM_n , sin reforzar (kN-m)	362	Momento resistente
M_u (kN-m)	399	Momento último requerido
FRP	SI	Se requiere reforzar con FRP?

Tabla 2 - Resumen del reforzamiento a flexión

ΦM_n , sección reforzada (kN-m)	331	Momento de la sección reforzada con FRP
---------------------------------------	-----	---

Refuerzo Estructural de Elementos de Hormigón con Fibras de Carbono (PRFC).

Mu (kN-m)	399	Momento último requerido
Chequeo de la Sección Reforzada	NG	Verificar que $\Phi M_{n,sección\ reforzada} \geq M_u$
Chequeo antes del reforzamiento	OK	Chequeo de la resistencia existente del elemento estructural para satisfacer el ACI 440.2R-08 Sección 9.2 Eq. (9-1): $(\phi M_n)_{existing} \geq 1.1M_D + 0.75M_L$ or $1.1M_D + 1.0M_L$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Concreto	NG	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{c,s} \leq 0.45f'_c$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{s,s} \leq 0.80f_y$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero Tensionado	N/A	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{p,s} \leq 0.82f_{py}$ or $0.74f_{pu}$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del FRP	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{f,s} \leq \Psi_f f_{fu}$
CHEQUEO TOTAL A FLEXION	NG	

Tabla 3 - Resumen de los Parámetros Claves en Estado Ultimo

Ubicación del Eje Neutro (mm)	148,5	Ver de las líneas 254 a la 385 para la convención de signos.	
Modo de Falla	Falla del FRP		
	Deform. (mm/mm)	Esfuerzo (MPa)	Fuerza (kN)
Fibra Superior a Compresión del Concret	0,00145	25,31	834
Acero	0,00388	414,00	797
Acero Tensionado	0,00000	0,00	0
FRP	0,00389	621,80	37
Chequeo del Equilibrio de Fuerzas	-	-	0

Para ver los detalles de estos resultados, siga los cálculos en la parte inferior.

ANÁLISIS DEL REFORZAMIENTO A FLEXIÓN

Chequeo de la sección sin reforzar

Chequear si la sección es adecuada para ser reforzada a flexión. Los cálculos mostrando la capacidad de la sección sin reforzar ($A_f = 0$) no se muestran abajo. El diseñador debería chequear la capacidad a cortante existente asociada a la demanda incrementada.

Capacidad de la sección sin reforzar en estado último

$$(\phi M_n)_{existing} = 362 \text{ kN-m}$$

Calcular la resistencia requerida

$$1.1M_D + 0.75M_L = 240 \text{ kN-m}$$

$$1.1M_D + 1.0M_L = \text{N/A kN-m}$$

OK, < $(\phi M_n)_{existing}$
N/A $(\phi M_n)_{existing}$

Características del material del concreto y el acero

Módulo de elasticidad del concreto

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c} = 27606 \text{ MPa}$$

Deformación unitaria del concreto correspondiente a f'_c

$$\epsilon'_c = \frac{1.71 \cdot f'_c}{E_c} = 0,00214 \text{ mm/mm}$$

Deformación unitaria de fluencia del acero de refuerzo

$$\epsilon_{sy} = \frac{f_y}{E_s} = 0,00207 \text{ mm/mm}$$

Momento de inercia antes y después de fisurarse

Relación de módulos

$$n_s = \frac{E_s}{E_c} = 7,2447 \quad -$$

$$n_p = \frac{E_p}{E_c} = 7,1180 \quad -$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = 5,7958 \quad -$$

Area de la sección transversal total

$$A_{cg} = b_w h + (b - b_w) h_f = 189100 \text{ mm}^2$$

Determinar las propiedades de la sección para las condiciones de **FISURADA** y **NO FISURADA**. El chequeo de si la sección está inicialmente fisurada se harán más adelante en este programa.

Profundidad del eje neutro **ANTES** de la fisuración

$$c_{b_cr} = \frac{\frac{1}{2}(b - b_w)h_f^2 + \frac{1}{2}b_w h^2 + (n_s - 1)A'_s d' + (n_s - 1)A_s d + (n_p - 1)A_p d_p}{(b - b_w)h_f + b_w h + (n_s - 1)A'_s + (n_s - 1)A_s + (n_p - 1)A_p} = 319,40 \quad \text{mm}$$

Profundidad del eje neutro **DESPUES** de la fisuración. Lo cálculos no se muestran y se asume una relación esfuerzo - deformación lineal del concreto (razonable para un momento suficientemente bajo actuando en la sección).

$$c_{a_cr} = 181,14 \quad \text{mm}$$

Momento de inercia **ANTES** de la fisuración

$$I_g = \frac{1}{12}(b - b_w)h_f^3 + (b - b_w)h_f \left(c_{b_cr} - \frac{1}{2}h_f\right)^2 + \frac{1}{12}b_w h^3 + b_w h \left(c_{b_cr} - \frac{1}{2}h\right)^2 + (n_s - 1)A'_s (c_{b_cr} - d')^2 + (n_p - 1)A_p (c_{b_cr} - d_p)^2 + (n_s - 1)A_s (c_{b_cr} - d)^2 = 6519822015 \quad \text{mm}^4$$

Radio de giro **ANTES** de la fisuración

$$r_g = \sqrt{\frac{I_g}{A_{cg}}} = 185,68 \quad \text{mm}$$

Momento de inercia **DESPUES** de la fisuración

$$I_{cr} = 2469809484 \quad \text{mm}^4$$

Radio de giro **DESPUES** de la fisuración

$$r_{cr} = \sqrt{\frac{I_{cr}}{A_{cg}}} = 114,28 \quad \text{mm}$$

Características del material del acero tensionado

(No Aplicable, $A_p = 0$)

Fuerza en el acero tensionado

$$P_e = A_p f_{pe} = 0 \quad \text{N}$$

Excentricidades de la fuerza de tensionamiento respecto al eje neutro antes (b_cr) y después (a_cr) de la fisuración

$$e_{b_cr} = d_p - c_{b_cr} = 0,00 \quad \text{mm}$$

$$e_{a_cr} = d_p - c_{a_cr} = 0,00 \quad \text{mm}$$

Deformación unitaria inicial en el acero tensionado

$$\varepsilon_{pi} = \frac{P_e}{A_p E_p} + \frac{P_e}{A_{cg} E_c} \left(1 + \frac{e_{b,cr}^2}{r_g^2} \right) = 0,0000000 \quad \text{mm/mm}$$

Determinar si la sección está inicialmente fisurada (antes de la instalación del FRP)

Módulo de ruptura del concreto (para concreto de peso normal)

$$f_r = 0.623 \cdot \sqrt{f_c'} = 3,66 \quad \text{MPa}$$

Momento de fisuración

$$M_{cr} = \left(f_r + \frac{P_e}{A_{cg}} \right) \frac{I_g}{h - c_{b,cr}} + P_e e_{b,cr} = 82 \quad \text{kN-m}$$

Sección inicialmente fisurada

Posición inicial del eje neutro

$$c_i = 181,1 \quad \text{mm}$$

Determinar las deformaciones unitarias iniciales en la sección transversal

Deformación inicial en la fibra inferior del concreto para condiciones **sin fisurar** ($\varepsilon_{bi,g}$) y **fisurada** ($\varepsilon_{bi,cr}$)

Sin fisurar:

$$\varepsilon_{bi,g} = \frac{M_i(h - c_{b,cr})}{E_c I_g} - \frac{P_e}{A_{cg} E_c} \left[1 + \frac{e_{b,cr}(h - c_{b,cr})}{r_g^2} \right] = \text{N/A} \quad \text{mm/mm} \quad (\text{tracción tiene signo positivo})$$

Fisurada:

$$\varepsilon_{bi,cr} = \frac{M_i(h - c_{a,cr})}{E_c I_{cr}} - \frac{P_e}{A_{cg} E_c} \left[1 + \frac{e_{a,cr}(h - c_{a,cr})}{r_{cr}^2} \right] = 0,00062 \quad \text{mm/mm} \quad (\text{tracción tiene signo positivo})$$

Deformación inicial en la fibra inferior del concreto

$$\varepsilon_{bi} = 0,0006164 \quad \text{mm/mm} \quad (\text{tracción tiene signo positivo})$$

Deformaciones iniciales en la fibra superior del concreto, acero a compresión y acero

$$\varepsilon_{ti} = \frac{c_i}{h - c_i} \varepsilon_{bi} = 0,00026 \quad \text{mm/mm} \quad (\text{compresión tiene signo positivo})$$

$$\varepsilon_{st}' = \frac{c_i - d'}{h - c_i} \varepsilon_{bi} = -0,00052 \quad \text{mm/mm} \quad (\text{compresión tiene signo positivo})$$

$$\varepsilon_{st} = \frac{d - c_i}{h - c_i} \varepsilon_{bi} = 0,00052 \quad \text{mm/mm} \quad (\text{tracción tiene signo positivo})$$

Determinar las propiedades de diseño del FRP

Deformación unitaria y esfuerzo últimos en el sistema FRP por condiciones ambientales

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* = 0,01606 \quad \text{mm/mm}$$

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* = 2660 \quad \text{MPa}$$

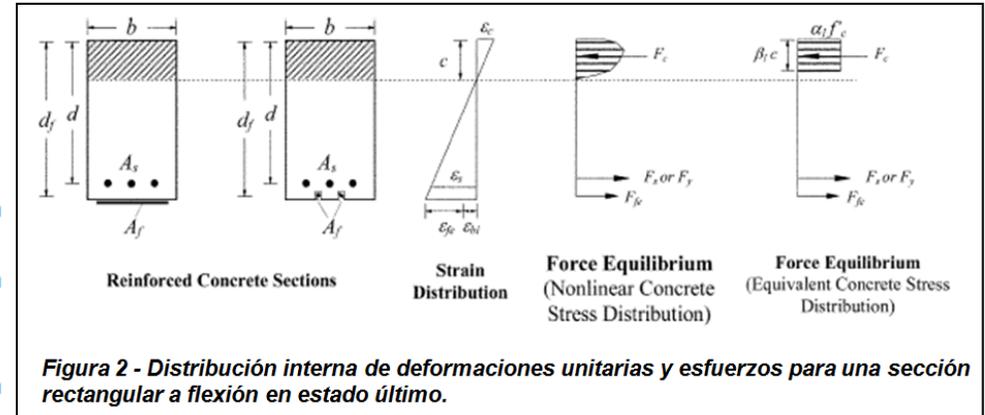
Deformación unitaria de diseño del sistema FRP para barras y laminados NSM

Barras NSM: $\varepsilon_{fd} = 0.6 \varepsilon_{fu} =$ N/A mm/mm

Laminados:
$$\varepsilon_{fd} = \min \left(0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n E_f t_f}}, 0.9 \varepsilon_{fu} \right) = 0,00389 \quad \text{mm/mm}$$

La deformación unitaria de diseño del FRP que gobierna es:

$$\varepsilon_{fd} = 0,00389 \quad \text{mm/mm}$$



Cálculo de la posición del eje neutro en estado último

La capacidad a flexión depende de la posición del eje neutro "c", el cual puede hallarse usando un procedimiento iterativo que empieza con un estimativo de "c". Los pasos de 1 a 6 se repetirán varias veces. Solo se muestra abajo la última iteración (con el valor correcto de c).

Paso #1

Posición del eje neutro

$$c_u = 148,5 \quad \text{mm}$$

Paso #2

Cálculo de las deformaciones en la **fibra superior del concreto** para diferentes modos de falla

1) Aplastamiento del concreto (modo 1)

$$\varepsilon_{cu1} = 0,00300 \quad \text{mm/mm}$$

2) Ruptura del Tendon (modo 2)

$$\varepsilon_{cu2} = \begin{cases} 0.003 & \text{if } A_p = 0 \\ \frac{(0.035 - \varepsilon_{pi})c_u}{d_p - c_u} & \text{otherwise} \end{cases} = 0,00300 \quad \text{mm/mm}$$

3) Falla del FRP, delaminación o ruptura (modo 3)

$$\varepsilon_{cu3} = \begin{cases} 0.003 & \text{if } A_f = 0 \\ \frac{(\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi})c_u}{h - c_u} & \text{otherwise} \end{cases} = 0,00145 \quad \text{mm/mm}$$

El modo de falla que gobierna es:

Falla del FRP

$$\epsilon_{cu} = 0,00145 \quad \text{mm/mm}$$

Paso #3

Cálculo de las deformaciones unitarias en estado último basados en ϵ_{cu} (Ver Figura 2)

Deformación unitaria en el **acero a compresión** en estado último

$$\epsilon'_s = \begin{cases} 0 & \text{if } A'_s = 0 \\ \epsilon_c \frac{c_u - d'}{c_u} & \text{otherwise} \end{cases} = 0,00000 \quad \text{mm/mm}$$

Deformación unitaria en el **acero a tracción** en condiciones últimas

$$\epsilon_s = \begin{cases} 0 & \text{if } A_s = 0 \\ \epsilon_c \frac{d - c_u}{c_u} & \text{otherwise} \end{cases} = 0,00388 \quad \text{mm/mm}$$

Deformación unitaria en el **acero tensionado** en condiciones últimas

$$\epsilon_{ps} = \begin{cases} 0 & \text{if } A_p = 0 \\ \epsilon_{pi} + \epsilon_c \frac{d_p - c_u}{c_u} & \text{otherwise} \end{cases} = 0,00000 \quad \text{mm/mm}$$

Deformación unitaria en el **FRP** en condiciones últimas

$$\epsilon_f = \begin{cases} 0 & \text{if } A_f = 0 \\ \epsilon_{cu} \frac{h - c_u}{c_u} - \epsilon_{bi} & \text{otherwise} \end{cases} = 0,00389 \quad \text{mm/mm}$$

Paso #4

Cálculo de esfuerzos en condiciones últimas

Esfuerzo en el **acero a compresión** en condiciones últimas

$$f'_s = \begin{cases} f_y & \text{if } \epsilon'_s > \epsilon_{sy} \\ -f_y & \text{if } \epsilon'_s < -\epsilon_{sy} \\ E_s \epsilon'_s & \text{otherwise} \end{cases} = 0,000 \quad \text{MPa}$$

Esfuerzo en el **acero a tracción** en condiciones últimas

$$f_s = \begin{cases} f_y & \text{if } \epsilon_s > \epsilon_{sy} \\ -f_y & \text{if } \epsilon_s < -\epsilon_{sy} \\ E_s \epsilon_s & \text{otherwise} \end{cases} = 414,000 \quad \text{MPa}$$

Esfuerzo en el **acero tensionado** en condiciones últimas

$$f_{ps} = \begin{cases} f_{pu} = 1860 \text{MPa} & \begin{cases} 196500 \varepsilon_{ps} & \text{if } \varepsilon_{ps} \leq 0.0086 \\ 1860 - \frac{0.276}{\varepsilon_{ps} - 0.007} & \text{otherwise} \end{cases} \\ f_{pu} = 1720 \text{MPa} & \begin{cases} 196500 \varepsilon_{ps} & \text{if } \varepsilon_{ps} \leq 0.0076 \\ 1720 - \frac{0.276}{\varepsilon_{ps} - 0.0064} & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} = 0,000 \quad \text{MPa}$$

Esfuerzo en el **FRP** en condiciones últimas

$$f_{fe} = \varepsilon_f E_f = 621,796 \quad \text{MPa}$$

Paso #5

Calcular los parámetros del bloque de esfuerzos equivalente del concreto α y β asumiendo una relación esfuerzo-deformación como se muestra abajo:

$$f_c(\varepsilon) = f_c' \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_c'} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c'} \right)^2 \right]$$

Para secciones rectangulares o secciones en T donde el eje neutro está en la losa de la viga (caso A), la forma explícita de la solución es:

$$\begin{cases} \alpha = -\frac{2}{3} \varepsilon_c \frac{(-3\varepsilon_c' + \varepsilon_c)^2}{(-4\varepsilon_c' + \varepsilon_c) \varepsilon_c'^2} = 0,734 \\ \beta = \frac{1}{2} \frac{-4\varepsilon_c' + \varepsilon_c}{-3\varepsilon_c' + \varepsilon_c} = 0,715 \end{cases}$$

Para secciones en T donde el eje neutro queda en el alma de la viga y β cu queda en el flanche de la viga (caso B), no se reporta aquí la forma explícita de la solución. Se presenta en su lugar el valor de la solución:

$$\alpha = \quad \text{N/A}$$

$$\beta = \quad \text{N/A}$$

Para secciones en T donde tanto el eje neutro como β cu quedan en el alma de la viga (caso C), no se reporta aquí la forma explícita de la solución. Se presenta en su lugar el valor de la solución:

$$\alpha = \quad \text{N/A}$$

$$\beta = \quad \text{N/A}$$

Por lo tanto los valores aplicables a las secciones dadas son:

$$\alpha = 0,734$$

$$\beta = 0,715$$

Paso #6

Calcular las resultantes de fuerzas internas y chequear el equilibrio.

Las resultantes son:

$$C_c = \begin{cases} \alpha f'_c [\beta c_u b - (\beta c_u - h_f)(b - b_w)] & \text{for case C} \\ \alpha \beta f'_c c_u b & \text{for cases A, B} \end{cases} = 834 \text{ kN} \quad (\text{compresión en el concreto})$$

$$C'_s = f'_s A'_s = 0 \text{ kN} \quad (\text{compresión en el acero a compresión})$$

$$T_s = f_s A_s = 797 \text{ kN} \quad (\text{tracción en el acero a tracción})$$

$$T_{ps} = f_{ps} A_p = 0 \text{ kN} \quad (\text{tracción en el acero tensionado})$$

$$T_{fe} = f_{fe} A_f = 37 \text{ kN} \quad (\text{tracción en el FRP})$$

Chequear que la fuerza resultante sea nula:

$$C_c + C'_s - T_s - T_{ps} - T_{fe} = 0 \text{ kN} \quad \boxed{\text{OK}}$$

Cálculo y chequeo de la capacidad a flexión en condiciones últimas

Contribución del acero a la flexión:

$$M_{ns} = T_s \left(d - \frac{\beta c_u}{2} \right) = 393 \text{ kN-m}$$

Contribución del acero tensionado a la flexión:

$$M_{np} = T_{ps} \left(d_p - \frac{\beta c_u}{2} \right) = 0 \text{ kN-m}$$

Contribución del FRP a la flexión:

$$M_{nf} = T_{fe} \left(h - \frac{\beta c_u}{2} \right) = 21 \text{ kN-m}$$

Refuerzo Estructural de Elementos de Hormigón con Fibras de Carbono (PRFC).

Cálculo del factor ϕ . En caso de que haya tensionamiento del acero, el ϕ total corresponderá al estado de deformación del acero tensionado en estado último.

Estado de deformación unitaria del **acero** en estado último

$$\phi = \begin{cases} 0.9 & \text{if } \varepsilon_s > 0.005 \\ 0.65 + \frac{\varepsilon_s - 0.002}{250/3} & \text{if } 0.005 > \varepsilon_s > 0.002 \\ 0.65 & \text{if } \varepsilon_s < 0.002 \end{cases} = 0.81$$

Estado de deformación unitaria del **acero tensionado** en estado último

$$\phi = \begin{cases} 0.9 & \text{if } \varepsilon_{ps} > 0.013 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_{ps} - 0.010)}{0.013 - 0.010} & \text{if } 0.013 > \varepsilon_{ps} > 0.010 \\ 0.65 & \text{if } \varepsilon_{ps} < 0.010 \end{cases} = \text{N/A}$$

Factor ϕ total

$$\phi = 0.81$$

Calcular la demanda a flexión en estado último:

$$M_{u1} = 1.2M_D + 1.6M_L = 399 \text{ kN-m}$$

Calcular la resistencia a flexión de diseño considerando un factor de reducción adicional de $\psi_f = 0.85$:

$$\phi M_n = \phi (M_{ns} + M_{np} + \psi_f M_{nf}) = 331 \text{ kN-m}$$

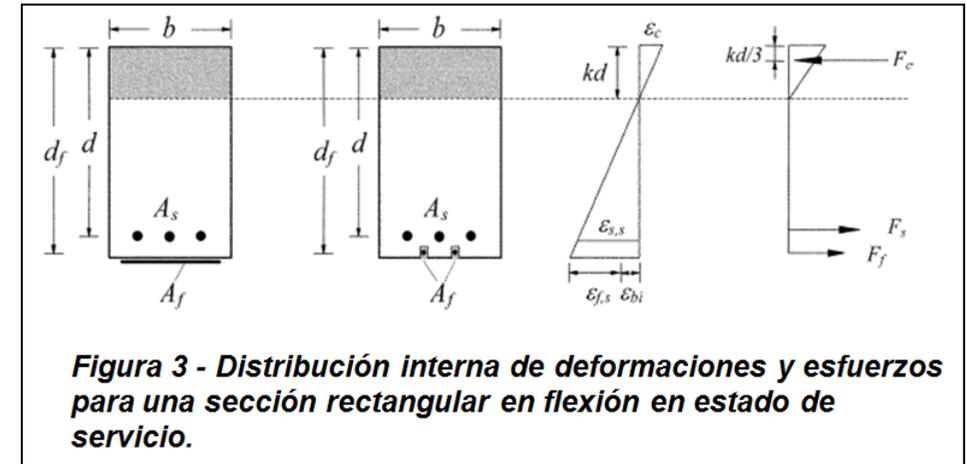


Figura 3 - Distribución interna de deformaciones y esfuerzos para una sección rectangular en flexión en estado de servicio.

Sección NO adecuada

Determinar las deformaciones unitarias en servicio

Determinar el momento de servicio (incluyendo cargas cíclicas):

$$M_s = M_D + M_L = 274 \text{ kN-m}$$

Chequear si la sección está fisurada en servicio:

$$M_{cr} = 82 \text{ kN-m}$$

Sección fisurada en servicio

Si la sección NO ESTA FISURADA: (No Aplicable)

Profundidad del eje neutro en servicio si la sección **NO está fisurada**

$$c_{b_cr} = \frac{\frac{1}{2}(b - b_w)h_f^2 + \frac{1}{2}b_w h^2 + (n_s - 1)A'_s d' + (n_s - 1)A_s d + (n_p - 1)A_p d_p}{(b - b_w)h_f + b_w h + (n_s - 1)A'_s + (n_s - 1)A_s + (n_p - 1)A_p} = \quad \text{N/A} \quad \text{mm}$$

Deformación unitaria en servicio en la fibra inferior del concreto para una sección **NO FISURADA**

$$\epsilon_{bs_g} = \frac{M_s(h - c_{b_cr})}{E_c I_g} - \frac{P_e}{A_{cg} E_c} \left[1 + \frac{\epsilon_{b_cr}(h - c_{b_cr})}{r_g^2} \right] = \quad \text{N/A} \quad \text{mm/mm} \quad (\text{tracción tiene signo positivo})$$

Deformaciones unitarias en servicio para una sección no fisurada en la fibra superior del concreto, acero a compresión, acero tensionado, acero a tracción y FRP

$$\epsilon_{cs} = \frac{c_{b_cr}}{h - c_{b_cr}} \epsilon_{bs_g} = \quad \text{N/A} \quad \text{mm/mm} \quad (\text{compresión tiene signo positivo})$$

$$\epsilon'_{ss} = \frac{c_{b_cr} - d'}{h - c_{b_cr}} \epsilon_{bs_g} = \quad \text{N/A} \quad \text{mm/mm} \quad (\text{compresión tiene signo positivo})$$

$$\epsilon_{ps} = \frac{d_p - c_{b_cr}}{h - c_{b_cr}} \epsilon_{bs_g} + \epsilon_{pi} = \quad \text{N/A} \quad \text{mm/mm} \quad (\text{tracción tiene signo positivo})$$

$$\epsilon_{ss} = \frac{d - c_{b_cr}}{h - c_{b_cr}} \epsilon_{bs_g} = \quad \text{N/A} \quad \text{mm/mm} \quad (\text{tracción tiene signo positivo})$$

$$\epsilon_{fs} = \epsilon_{bs_g} - \epsilon_{bi} = \quad \text{N/A} \quad \text{mm/mm} \quad (\text{tracción tiene signo positivo})$$

Si la sección está FISURADA:

La profundidad del eje neutro en servicio si la sección está FISURADA se determina asumiendo que la relación esfuerzo-deformación del concreto puede aproximarse como lineal. No se muestran las ecuaciones usadas para obtener la solución a través de un proceso iterativo. Se usan valores iniciales estimativos de la profundidad del eje neutro (límite inferior y límite superior) para iniciar el proceso iterativo. Las líneas 462 y 463 seleccionan valores iniciales que darán solución a la convergencia para la mayoría pero no para todos los casos. Si no se satisface el equilibrio de fuerzas en la sección (ver la línea 497), es necesario que el usuario cambie los valores iniciales en las líneas 465 y 466 hasta que chequee el equilibrio.

$c_{lower} =$	61	mm	Límite inferior por default del eje neutro
$c_{upper} =$	244	mm	Límite superior por default del eje neutro
$c_{lower} =$	100	mm	Límite inferior por default del eje neutro OK, introduzca '1.00'
$c_{upper} =$	200	mm	Límite superior por default del eje neutro OK, introduzca h/2
$c_{cr} =$	183	mm	OK, Equilibrio satisfecho

Refuerzo Estructural de Elementos de Hormigón con Fibras de Carbono (PRFC).

Deformaciones unitarias en servicio para la sección **FISURADA** en la fibra superior del concreto, acero a compresión, acero tensionado, acero a tracción y FRP

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cs} &= 0,00072 \text{ mm/mm} && \text{(compresión tiene signo positivo)} \\ \varepsilon'_{ss} &= \varepsilon_{cs} \frac{c - d'}{c} = -0,00143 \text{ mm/mm} && \text{(compresión tiene signo positivo)} \\ \varepsilon_{ps} &= \varepsilon_{cs} \frac{d_p - c}{c} + \varepsilon_{pi} = 0,00143 \text{ mm/mm} && \text{(tracción tiene signo positivo)} \\ \varepsilon_{ss} &= \varepsilon_{cs} \frac{d - c}{c} = 0,00143 \text{ mm/mm} && \text{(tracción tiene signo positivo)} \\ \varepsilon_{fs} &= \varepsilon_{cs} \frac{h - c}{c} - \varepsilon_{bi} = 0,00107 \text{ mm/mm} && \text{(tracción tiene signo positivo)} \end{aligned}$$

Calcular las resultantes de fuerzas internas y chequear el equilibrio.

Las resultantes son:

$$C_{cs} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_{cs}}{2} b c E_c & \text{if } c < h_f \text{ or } h_f = 0 \\ \frac{\varepsilon_{cs}}{2} \left(1 + \frac{c - h_f}{c}\right) b h_f + \frac{\varepsilon_{cs}}{2} \frac{(c - h_f)^2}{c} b_w & \text{otherwise} \end{cases} = 563 \text{ kN} \quad \text{(compresión en el concreto)}$$

$$C'_{ss} = \varepsilon'_{ss} E_s A'_s = 0 \text{ kN} \quad \text{(compresión en el acero a compresión)}$$

$$T_{ss} = \varepsilon_{ss} E_s A_s = 552 \text{ kN} \quad \text{(tracción en el acero a tracción)}$$

$$T_{ps} = \varepsilon_{ps} E_p A_p = 0 \text{ kN} \quad \text{(tracción en el acero tensionado)}$$

$$T_{ps} = \varepsilon_{ps} E_p A_p = 0 \text{ kN} \quad \text{(tracción en el acero tensionado)}$$

$$T_{fs} = \varepsilon_{fs} E_f A_f = 10 \text{ kN} \quad \text{(tracción en el FRP)}$$

Chequear que la fuerza resultante sea nula:

$$C_{cs} + C'_{ss} - T_{ss} - T_{ps} - T_{fs} = 0 \text{ kN} \quad \boxed{\text{OK}}$$

Chequear los esfuerzos en servicio

Calcular los esfuerzos en la fibra superior del concreto en estado de servicio

$$f_{c_s} = E_c \epsilon_{ts} = \quad 20 \quad \text{MPa} \quad (\text{compresión tiene signo positivo})$$

Chequear el esfuerzo límite del concreto en estado de servicio

$$0.45f'_c = \quad 16 \quad \text{MPa} \quad \boxed{\text{NG}}$$

Calcular los esfuerzos en el acero en estado de servicio

$$f_{s_s} = E_s \epsilon_{ss} = \quad 287 \quad \text{MPa} \quad (\text{tensión tiene signo positivo})$$

Chequear el esfuerzo límite del acero en estado de servicio

$$0.80f_y = \quad 331 \quad \text{MPa} \quad \boxed{\text{OK}}$$

Calcular los esfuerzos en el acero tensionado en estado de servicio

$$f_{p_s} = E_p \epsilon_{ps} = \quad \text{N/A} \quad \text{MPa} \quad (\text{tensión tiene signo positivo})$$

Chequear el esfuerzo límite en el acero tensionado

$$0.82f_{py} = \quad 1386 \quad \text{MPa} \quad \boxed{\text{N/A}}$$

$$0.74f_{pu} = \quad 1376 \quad \text{MPa} \quad \boxed{\text{N/A}}$$

Calcular los esfuerzos en el FRP en estado de servicio

$$f_{t_s} = E_f \epsilon_{fs} = \quad 171 \quad \text{MPa} \quad (\text{tensión tiene signo positivo})$$

Chequear el esfuerzo límite del FRP en estado de servicio

$C_{e,r}f_{tu} =$ 1463 MPa

OK

NOTA: El ingeniero deberá verificar los resultados de este programa con cálculos manuales suplementarios; esta ayuda de diseño no es la única herramienta absoluta. El ingeniero también deberá verificar los requerimientos de detalles según el ACI440.2R-08 Capítulo 13. Ellos incluyen los chequeos de la longitud de desarrollo para aplicaciones NSM y de laminados como se muestra abajo.

Longitud de desarrollo para laminados

$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{f'_c}}}$$

Longitud de desarrollo para barras NSM

$$l_{db} = \frac{d_b}{4(\tau_b)} f_f d$$

Longitud de desarrollo para barras rectangulares NSM

$$l_{db} = \frac{a_b b_b}{2(a_b + b_b)(\tau_b)} f_f d$$

Capítulo 6

EJECUCIÓN Y APLICACIÓN EN OBRA

6.1 Introducción

Los procedimientos para la instalación de sistemas de refuerzo de PRFC han sido desarrollados por las guías de diseño y también con los catálogos técnicos de las empresas que lo comercializan. Muchas veces existen diferencias entre estos sistemas y los procedimientos de instalación pueden variar en cada sistema de refuerzo en función del tipo y condición de la estructura.

Aunque el proceso de ejecución es relativamente sencillo y no requiere herramientas muy sofisticadas ni mano de obra demasiado especializada, los instaladores de los sistemas de PRFC deben ser contratistas calificados de acuerdo al proceso de instalación desarrollado por la empresa manufacturera.

El equipo de trabajo contratado para la ejecución del trabajo debe demostrar las competencias para ejecutar las fases de preparación de la superficie y aplicación del sistema de refuerzo. La experiencia del contratista puede ser demostrada siempre y cuando existan datos de formación y documentación de trabajos relacionados ejecutados anteriormente. La empresa que comercializa el sistema debe a su vez formar al personal que aplica estos sistemas y garantizar su calificación para la ejecución.

La temperatura, humedad relativa y la humedad de la superficie en el momento de la instalación afectan al rendimiento de los sistemas de PRFC. Las condiciones que deben comprobarse antes y durante la instalación incluyen la temperatura superficial del hormigón, temperatura del aire, humedad relativa y punto de rocío [1].

La imprimación y adhesivos de epoxi no deben aplicarse sobre superficies frías y heladas, y tampoco mojadas o húmedas. Las empresas que fabrican productos de PRFC disponen de fichas técnicas con datos para las condiciones de aplicación. Existen soluciones y alternativas ante adversidades que también pueden ser consultadas con estas empresas. El comportamiento de los elementos estructurales reforzados con fibras de carbono es altamente dependiente del sustrato de hormigón donde van a ser aplicados y de su perfilado y preparación previa. En caso contrario, pueden producirse despegues o delaminaciones del refuerzo provocando que no se alcancen a transferir las cargas proyectadas. Cabe mencionar que la preparación del sustrato puede generar ruido, polvo y molestias a los ocupantes del edificio [1].

La garantía y control de calidad del trabajo terminado pueden llevarse a cabo por las empresas manufactureras, los contratistas de su instalación y el resto del personal implicado en el proyecto. El programa de control de calidad debe cubrir todos los puntos del proyecto, con mayor o menor grado de alcance en función de la complejidad del proyecto. La garantía de calidad de ejecución se consigue a través de una serie de inspecciones y pruebas para documentar el visto bueno de la instalación. Las especificaciones del proyecto deben incluir un plan de control para la instalación y curado de los sistemas de PRFC [1]

6.2 Ejecución del refuerzo con laminados pultruidos longitudinales

6.2.1 Descripción del sistema

El sistema de materiales compuestos comprende laminados de polímeros reforzados con fibra de carbono y resina epoxi como adhesivo estructural. El principal campo de aplicación es el refuerzo de elementos constructivos, losas y vigas sometidos a esfuerzos de flexión.

Las empresas que comercializan el producto disponen de diferentes tipos de laminados en el mercado, de forma que se adapte a las necesidades del cálculo y su puesta en obra. Existen varias dimensiones de ancho y espesor del laminado, lo que determina diferentes secciones de refuerzo, y varias alternativas de módulo de elasticidad y resistencia a la tracción de la fibra de carbono, adoptando la que más se ajuste a las exigencias del proyecto. Toda la información, fichas técnicas y consulta pueden solicitarse a las empresas distribuidoras de estos productos.

Existen una serie de productos complementarios para la preparación del soporte de hormigón armado a reforzar, previo a la colocación del refuerzo, y para el acabado una vez ejecutado el refuerzo. Se irán analizando durante el estudio del proceso de ejecución en obra.

6.2.2 Consideraciones previas generales

Previo a la realización de los trabajos se debe considerar lo siguiente:

- Revisar las especificaciones del proyecto con detalle.
- Inspeccionar las superficies para la ejecución de los trabajos, y en el caso de que se detecten imperfecciones en ellas, buscar soluciones para mejorarlas.
- Preparar y chequear todo el equipo y materiales a usar. Se recomienda que los laminados se corten en las longitudes correspondientes a aplicar antes de cualquier trabajo, como el mezclado de la resina, y siempre hacerlo con las herramientas adecuadas (tijeras especiales o sierras).
- Proteger todo lo que se encuentre en los alrededores de la zona de trabajo del polvo o de los daños que puedan sufrir por los trabajos de preparación [1].

6.2.3 Consideraciones previas para una buena unión

Durante la ejecución, se debe verificar que el pegado del laminado sea continuo, sin burbujas entre este y el soporte. También se deben chequear los cruces de laminados para que la aplicación del adhesivo estructural sea continua [1].

La resina puede presentar problemas si se mezclan grandes cantidades y/o a altas temperaturas. Para un mejor rendimiento de la mezcla es aconsejable reducir las cantidades de los componentes de la mezcla y/o la temperatura de los materiales [1]. También es recomendable anotar los números de lote de los productos laminados y de la resina usada cada día [1].

Para la aplicación de estos sistemas en condiciones de frío o calor, se deben controlar las condiciones previas del material, donde fue almacenado las 24 horas antes con el fin de mejorar el mezclado, aplicación y los límites del tiempo de aplicación de la mezcla [3].



Figura 6.1: Acopio del material en la obra. Sencillo y rápido por su bajo peso [12]

Se debe tomar especial atención en las condiciones ambientales. Verificar las temperaturas mínimas/máximas del soporte, del ambiente y de los materiales así como el punto de rocío (Temperatura de aplicación mayor a +5 °C) [3].

La humedad del soporte debe ser menor que el 4%. Este es un dato importante ya que una vez aplicado el refuerzo, éste va a funcionar como barrera impidiendo el secado de la superficie de hormigón. Por lo tanto todas las superficies de hormigón deben estar secas, libres de humedad y sin escarcha [3].

6.2.4 Medidas de seguridad en la obra

Es importante exigir siempre la utilización de la ropa y elementos de seguridad adecuados (guantes, lentes, traje cerrado y casco).

Al igual que en otros trabajos de este tipo, se debe tener un lugar de trabajo ordenado y limpio. Los equipos se deben limpiar, sobre todo la brocha o el elemento con el cual se aplica la resina epoxi.

En caso de ser necesario eliminar resinas endurecidas, se debe hacer con herramientas mecánicas adecuadas para esta tarea. Las herramientas se deberán limpiar después de su uso [3].



Figura 6.1: Zona de trabajo y preparación de los refuerzos [12].

6.2.5 Preparación del soporte de hormigón

Las superficies a tratar se presentarán de tal manera que en el momento de ejecutar los trabajos de refuerzo, éstas estén en perfectas condiciones. Para esto se eliminarán las lechadas superficiales, manchas, suciedad, partes mal adheridas, etc [12].

La superficie de hormigón debe ser escarificada en la zona donde se vayan a pegar los laminados, entre 10 y 15 mm, hasta que queden expuestos los agregados gruesos. Esto se realiza con alguna herramienta escarificadora, y de esta manera se obtiene una buena unión entre el laminado y la superficie de hormigón [12].



Figura 6.3: Escarificado del hormigón previo a la aplicación del adhesivo [12].

Después de esta preparación, se debe limpiar la superficie y aspirarla hasta obtener una superficie libre de polvo. Todas las superficies se deben reparar con el compresor de aire y aspirar para eliminar todo el resto de polvo.

Según las recomendaciones, la superficie que se va a reforzar tiene que estar nivelada con resaltos y oquedades menores a 0,5 mm. Se debe comprobar la nivelación de la superficie con una regla, para una de 2 m la tolerancia máxima es de 4 mm [1].



Figura 6.4: Preparación del soporte [12].

Para la reparación o eliminación de las irregularidades se procederá a la aplicación de morteros cementicios de reparación, seleccionando el tipo de mortero a aplicar en función del espesor de las irregularidades [12].

6.2.6 Mezclado de la resina epoxi

La resina epoxi es un producto bicomponente. Para su aplicación se deben mezclar los dos componentes A y B durante al menos 3 minutos con una batidora eléctrica (Figura 6.5) de bajas revoluciones (máximo 600 r.p.m.) hasta que el material tenga una consistencia y color gris homogéneo. Se debe verter la mezcla en un recipiente y batir nuevamente durante 1 minuto aproximadamente. Es importante respetar los tiempos de mezclado para el correcto endurecimiento de la resina. La proporción de la mezcla es dada por el fabricante.



Figura 6.5: Mezcla del adhesivo epoxi. [12].

6.2.7 Aplicación del refuerzo de PRFC

Debido a su bajo peso no se requieren elementos para apuntalar las láminas, de manera que no se interfiere en el desarrollo del resto de trabajos de la obra.

Para la puesta en servicio hay que tener en cuenta que el adhesivo va adquiriendo resistencia desde el momento en que es colocado hasta alcanzar su endurecimiento total a los 7 días. Por lo tanto es necesario esperar este tiempo hasta sobrecargar el elemento estructural [3].

6.2.7.1 Aplicación de la Resina-Adhesivo

Antes de empezar la aplicación de la resina sobre el soporte previamente preparado, se deben preparar los laminados, que ya deberán estar cortados en las longitudes adecuadas. Esta preparación de los laminados consiste en su limpieza. Se coloca el laminado sobre una mesa y se limpia la superficie con líquido limpiador a base de solventes orgánicos usando un paño limpio. En el caso de que se tengan que colocar capas adicionales de laminados se limpiarán ambas caras [3].



Figura 6.6: Limpieza del laminado con un limpiador y un trapo hasta que quede libre de polvo u otros contaminantes [12].

Una vez limpio el laminado, se colocará una capa de adhesivo cuidadosamente sobre el soporte con una espátula formando una capa fina (aproximadamente 1 mm). A continuación, o a la vez, se aplica el adhesivo sobre el laminado con una espátula especial de forma curvada o con ayuda de una herramienta que se puede construir fácilmente con una tabla de madera, dos listones y una chapa metálica. Se pegan los dos listones a la tabla con la separación correspondiente al laminado, a mitad de los listones se clava la chapa metálica dejando una altura libre desde la tabla de madera de 2 mm aprox., de manera que el espesor de adhesivo aplicado sea de 1 mm (Figura 6.7) [12].



Figura 6.7: Aplicación de la resina sobre el laminado [12].

Con esta herramienta se garantiza que la aplicación del adhesivo sobre el laminado sea continua y uniforme.

6.2.7.2 Colocación del laminado de fibra de carbono

Dentro del tiempo abierto del adhesivo, se coloca el laminado de refuerzo con adhesivo epoxi sobre la superficie del soporte donde se haya aplicado previamente la resina. Usando un rodillo de goma se presiona el laminado hasta que el adhesivo sea forzado a salir por ambas caras del mismo. Luego se retira el adhesivo sobrante [12].



Figura 6.8: Colocación del laminado sobre el soporte y pasado de rodillo [12].

Se debe evitar aplicar una fuerza excesiva al pasar el rodillo de goma para evitar la salida excesiva de adhesivo por ambas caras del mismo, lo que provocaría que quede un menor espesor de adhesivo que el adecuado [12].

No se deben realizar solapes de laminados (uniones longitudinales), ya que en esa zona concreta se producen picos de tensión los cuales pueden llevar al colapso de la unión adherida, produciéndose el despegue del laminado. Es decir, el refuerzo debe ser continuo. Los materiales se comercializan en rollos de forma que la longitud del laminado se puede adaptar a las necesidades, evitando cortes y solapes entre unidades [12].

6.2.7.3 Disposiciones generales de colocación de los laminados

El refuerzo a flexión mediante laminados adheridos en la cara externa del elemento a reforzar implica la posibilidad de colocar el mismo tanto en la cara inferior del elemento para cubrir momentos negativos, como en la cara superior para cubrir momentos positivos (menos frecuente).

El cálculo estructural indica el número de laminados a colocar y sus longitudes totales, donde también se incluye la longitud de anclaje que prevea el cálculo.

Respecto a la separación entre laminados, se debe tener en cuenta una separación mínima igual al recubrimiento de las armaduras de hormigón según la exposición del ambiente. Esta separación mínima se debe de cumplir al igual que para los bordes del hormigón. En el capítulo de cálculo se detallan estas separaciones.

6.2.7.4 Capas adicionales o cruces entre laminados

Donde haya un cruce entre laminados, el primer laminado se debe limpiar con solvente antes de aplicar el adhesivo y colocar el segundo laminado. En la zona del cruce se aplicará una capa de adhesivo epoxi tanto sobre el soporte como en el laminado, de forma que no se cree una zona cóncava [12].

Otro caso donde se produce un cruce de laminados es cuando se refuerza a flexión y a corte a la vez (Figura 6.9).



Figura 6.9: Zonas de cruce entre láminas [12].

6.2.7.5 Preparación para el recubrimiento del laminado

Los laminados de fibra de carbono pueden ser protegidos contra al fuego si fuera necesario con un material resistente al fuego. También se pueden recubrir por cuestiones estéticas. Sobre la cara vista del laminado (que previamente a su colocación se limpió con solvente) se aplica una capa de adhesivo epoxi y en estado fresco se espolvorea arena, que actuará como superficie de agarre para el recubrimiento posterior [12].

6.2.8 Recubrimiento de los laminados

El laminado se puede recubrir con pinturas contra la carbonatación y la acción de los rayos UV. También se puede recubrir con morteros siempre que se desee tapar por cuestiones estéticas.

Si se desea proteger el refuerzo contra el fuego, se recomienda la utilización de placas ignífugas. También se pueden utilizar pinturas ignífugas, previa comprobación de la adherencia y compatibilidad con el laminado [12].

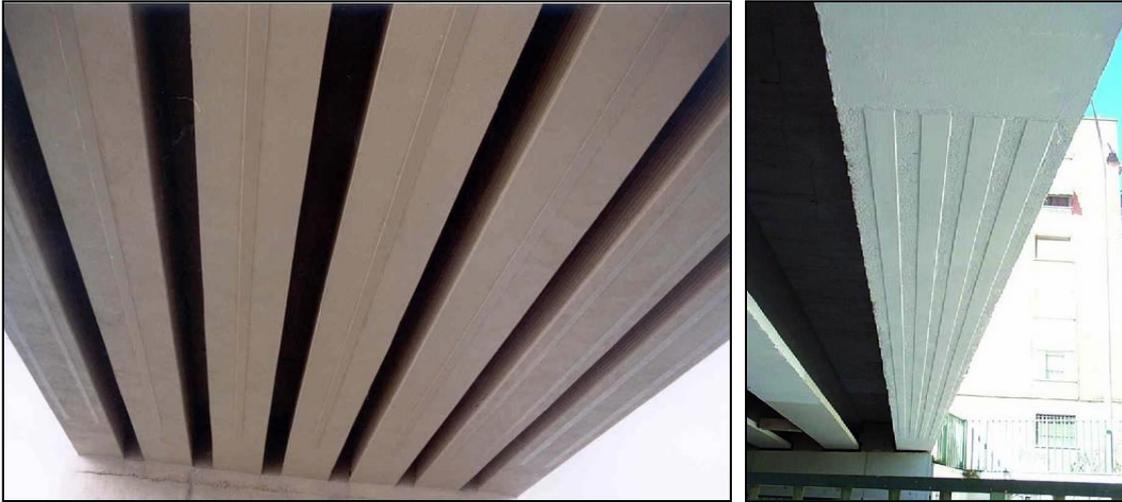


Figura 6.10: Detalle del recubrimiento de los laminados con pintura [12].

Se debe proteger el sistema de refuerzo con laminados tanto durante la instalación como una vez finalizada la misma para el curado correcto del adhesivo, por las temperaturas adversas, del contacto directo con la lluvia, polvo o suciedad, de la acción directa del sol, y de la alta humedad. Esta protección se puede realizar con plásticos [12].

6.2.9 Inspección

Se recomienda a modo de inspección tener un especial cuidado en lo siguiente [3]:

- Preparación de la superficie.
- Las etiquetas del envase del material.
- El mezclado de la resina.
- La aplicación de la resina sobre las fibras.
- El curado del material compuesto.
- Toma de muestras.

Una vez finalizados los trabajos de instalación del refuerzo se pueden realizar los siguientes ensayos:

- Ensayos semi-destructivos, Pull-off: ensayo de adherencia.
- Ensayos no-destructivos: se comprueba la uniformidad de la aplicación del refuerzo de PRFC con diferentes técnicas (Ej. Ultrasonido).

– Pruebas de carga.

6.3 Ejecución del refuerzo con laminados pultruidos en “L”

6.3.1 Consideraciones previas

Todas las consideraciones aplicadas al refuerzo mediante laminado longitudinal son aplicables para este tipo. El funcionamiento del sistema es similar al laminado y sus componentes son los mismos. La variante es el formato en que se presenta el laminado para el caso concreto de refuerzo a corte [12].

6.3.2 Preparación del soporte

Se deberá dejar preparada la zona de anclaje de los laminados. Esta preparación consiste en la realización de aberturas, lo más cercanas posibles al alma de la viga, de manera que se pueda aplicar el adhesivo e insertar la lámina.



Figura 6.11: Preparación de la superficie de hormigón [12].

6.3.3 Anclaje

Para que el angular se ancle correctamente en la zona de anclaje, se debe tratar previamente el brazo largo (por lo general, todo depende del canto del elemento estructural) con una capa de adhesivo epoxídico, aplicado con una llana dentada dejando dientes espaciados cada 5 mm aproximadamente, desde la parte de arriba y por una altura

de 100 a 200 mm (dependiendo de la longitud de diseño). El tiempo de espera para la resina antes de colocar el laminado en el soporte debe ser de 24 horas.



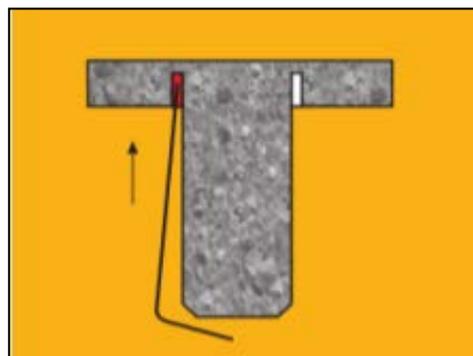
Figura 6.12: Anclaje de la lámina en la abertura [21].

Los agujeros realizados para el anclaje de los angulares se rellenan con el adhesivo estructural epoxídico.

6.3.4 Proceso de ejecución

Dentro del tiempo abierto del adhesivo, se debe insertar el angular con adhesivo dentro del hueco relleno de resina, de una manera ligeramente oblicua. Justo en el momento en el que se llega a la profundidad total se deben presionar los brazos del angular contra el soporte con un rodillo de goma hasta que el adhesivo sea forzado a salir por ambas caras del mismo. Se procede a retirar el adhesivo sobrante y limpiar con solvente el brazo inferior del angular para permitir el posterior pegado del segundo angular (Figura 6.13):

El brazo largo de la lámina se dobla ligeramente y se introduce en los taladros rellenos con pegamento epoxi.



Cuando se consigue la longitud de anclaje necesaria, el elemento se presiona con un rollo de goma contra el soporte.

La lámina en la cara opuesta se aplica exactamente de la misma forma que la anterior.

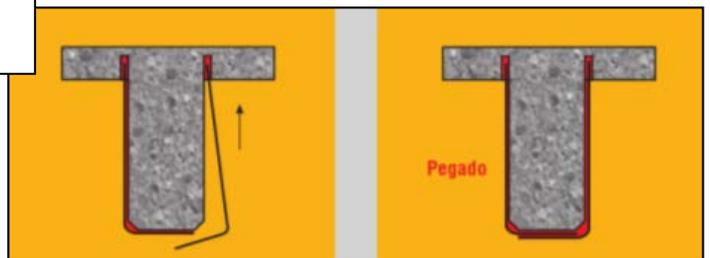


Figura 6.13: Esquema de refuerzo con láminas en L y anclajes realizados [12].

Disposiciones generales de colocación de los laminados

Los refuerzos mediante laminados en "L" son exclusivos para soportar esfuerzos cortantes actuando como estribos adheridos externamente al elemento estructural. Para estos refuerzos en U las separaciones máximas entre bandas de laminados será igual a $0,8 * b$ (siendo "b" es el canto útil del elemento estructural).

6.4 Ejecución del refuerzo con tejidos de PRFC curados in-situ

6.4.1 Descripción del sistema

El campo de aplicación del sistema de refuerzo con tejidos de PRFC y resinas de impregnación epoxi abarca el refuerzo a esfuerzos de flexión, corte y confinamiento, tales como losas, vigas, muros y columnas. Se puede aplicar en seco o húmedo. Ambos productos son aplicados directamente en la obra.

En el mercado se dispone de diferentes tipos de tejidos, de forma que se adaptan a las necesidades del cálculo y su puesta en obra. En el caso de tejidos, existen diferentes densidades en el gramaje, lo que condiciona diferentes resistencias a la tracción y módulo elástico, varios anchos de tejido y direcciones principales de trabajo en función de la orientación de las fibras, unidireccional y bidireccional [7].

Existen una serie de productos complementarios para la preparación del soporte de hormigón armado a reforzar, previo a la colocación del refuerzo, y para el acabado una vez ejecutado el refuerzo.

6.4.2 Consideraciones previas generales

Previo al inicio de los trabajos se debe:

- Revisar las especificaciones del proyecto en detalle.
- Inspeccionar las superficies para la ejecución de los trabajos, y en el caso de que se detecten imperfecciones en ellas, buscar la solución a dichos problemas.
- Preparar y chequear todo el equipo y materiales a usar. Se recomienda que los tejidos se corten en las longitudes correspondientes a aplicar antes de cualquier trabajo.
- Tener un especial cuidado para no doblar ni romper las fibras. No doblar los tejidos.
- Proteger todo lo que se encuentre en los alrededores de la zona de trabajo del polvo o de los daños que puedan sufrir por los trabajos de preparación [1].

6.4.3 Consideraciones previas para una buena unión

Valen las detalladas en la sección 6.2.3

6.4.4 Medidas de seguridad en la obra

Valen las detalladas en la sección 6.2.4

6.4.5 Preparación de la superficie

Las superficies a tratar deberán estar en perfectas condiciones, para lo cual se eliminarán las lechadas superficiales, manchas, suciedad, partes mal adheridas, pinturas antiguas, etc.

Las superficies de hormigón se prepararán con medios mecánicos, como con chorro de arena, chorro de agua a alta presión o mixto, o lijado de la superficie.



Figura 6.14: Preparación de la superficie de hormigón [12].

Todas las superficies se deben repasar con el compresor de aire limpio y aspirar para eliminar todo el resto de polvo. Las fisuras existentes en el hormigón con un ancho mayor a 0,25 mm se inyectarán previamente con una resina de baja viscosidad de base epoxídica.

Las esquinas se redondearán con un radio de curvatura mínimo de 20 mm o según venga especificado en el proyecto. Esto se puede realizar con morteros reparadores construyendo un borde redondeado.

Según las recomendaciones, la superficie que se va a reforzar tiene que estar nivelada con resaltes y oquedades menores de 0,5 mm. Se debe comprobar la nivelación

de la superficie con una regla, para la de 2 m la tolerancia máxima es de 4 mm. Para la reparación o eliminación de las irregularidades se procederá a la aplicación de morteros de reparación, seleccionando el tipo de mortero a aplicar en función del espesor de las irregularidades [12].

El hormigón deberá tener una resistencia mínima según se especifique en la hoja de datos del producto o las especificaciones del proyecto.

Se debe prestar especial atención a las condiciones ambientales. Comprobar la temperatura del soporte, atmosférica y de los materiales, así como el punto de rocío.

6.4.6 Aplicación en seco

En el proceso de aplicación en seco, el tejido se coloca directamente sobre el adhesivo de viscosidad media (Sikadur® -330 por ejemplo) aplicado previamente sobre la superficie de hormigón. La ventaja de este método es la facilidad de aplicación [12].

- Se corta el tejido con tijeras u otra herramienta de corte. Se agrega suficiente material para los solapes.



Figura 6.15: Recorte de tejidos [12].

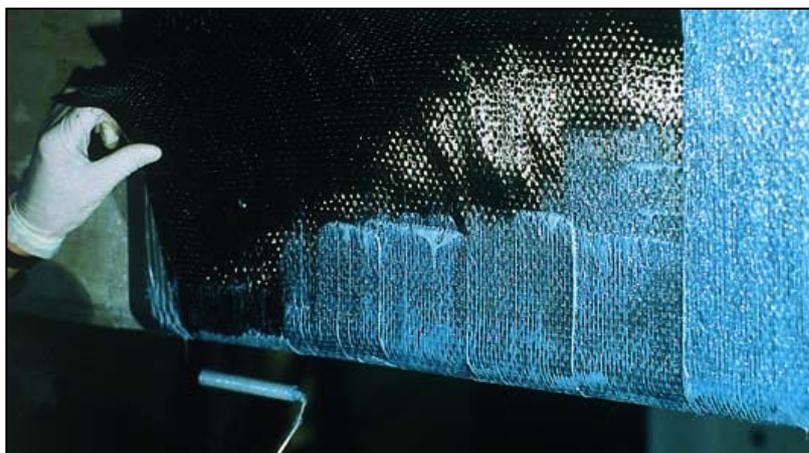
- Se aplica el adhesivo epoxi (Sikadur®-330 por ejemplo) sobre el soporte con llana o rodillo o brocha. El tejido se aplica directamente sobre la resina. Ya que ésta sirve tanto como imprimación y como impregnador del tejido a la misma vez, en este método se ahorra un paso.

Es decir, una vez mezclada correctamente la resina, se aplica sobre el soporte en una cantidad aproximada de 0,5 a 1 Kg/m², dependiendo de la rugosidad del soporte.



Figura 6.16: Aplicación de adhesivo epoxi [12].

- La aplicación del tejido sobre la resina se debe realizar en estado fresco, por lo que se debe prestar atención al tiempo abierto de la resina, siguiendo las recomendaciones del fabricante. Además, el tejido se debe colocar sobre la resina en la dirección adecuada, embebiendo el tejido en la misma, presionando con un rodillo especial para impregnación solo en la dirección de las fibras, hasta que la resina salga por los huecos del tejido. El solape en la dirección de la fibra debe ser mayor a 100 mm (dependiendo del tipo de tejido) o lo que se especifique en el proyecto.



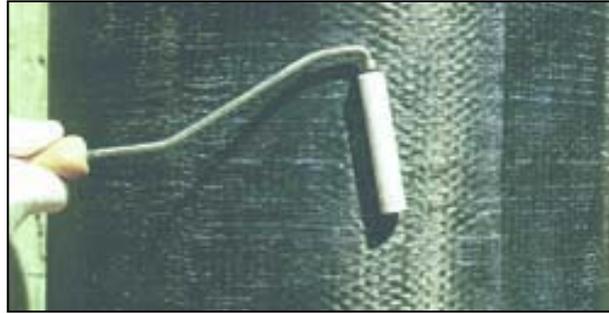


Figura 6.17: Aplicación del tejido sobre la resina [12].

A bajas temperaturas y/o alta humedad relativa, la superficie de la resina curada se puede volver pegajosa. Antes de aplicar otra capa adicional de tejido, o un recubrimiento sobre esta superficie, se debe eliminar esta capa con esponja saturada en agua y con bastante agua. Para ambos casos, se debe limpiar la superficie de esta manera antes de la aplicación de la siguiente capa o recubrimiento.

La cantidad adicional de resina a aplicar para colocar la siguiente capa dependerá del tipo de tejido, o sea del gramaje. Para colocar capas adicionales de tejido de fibras, se debe aplicar una nueva capa de resina dentro de los 60 minutos (a 23 °C) después de la aplicación de las capas previas y repetir el procedimiento de la laminación. Si esto no fuera posible, se deberá esperar al menos 12 horas antes de la aplicación de la siguiente capa.

- Si se desea se puede aplicar sobre la superficie del tejido de fibras un recubrimiento cementoso o pinturas, placas de protección, morteros, que pueden mejorar la resistencia a altas temperaturas. Para esto se debe aplicar una capa adicional de resina de aproximadamente 0,5 Kg/m² y aun en fresco espolvorear arena que actuará como superficie de agarre para el recubrimiento posterior. Si se va a recubrir con una pintura, la superficie fresca de la resina se puede alisar con una brocha.

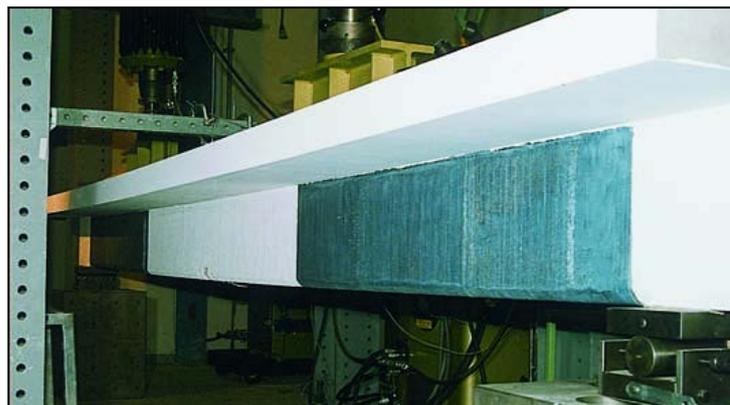




Figura 6.18: Aplicación de un recubrimiento sobre el refuerzo terminado [12].

6.4.7 Aplicación húmeda

Se aplica este método con el sistema húmedo a las fibras tejidas con un peso mayor que 300 g/m² y con todas las fibras no tejidas. El tejido (por ejemplo SikaWrap®) se impregna con la resina (por ejemplo Sikadur®) o con un saturador mecánico, o bien manualmente sobre una mesa de trabajo, y se aplica “humedo” sobre el elemento estructural. La ventaja de este sistema es que es ideal para grandes aplicaciones y tejidos pesados y tupidos.

Se deben seguir las recomendaciones del fabricante con respecto al tiempo abierto de la resina para los diferentes pasos de la aplicación.

- En primer lugar se corta el tejido con tijeras u otra herramienta de corte. Se agrega suficiente material para los solapes.



Figura 6.19: Recorte de tejidos [12].

- Se da una capa de sellado con el adhesivo Sikadur® -300 para soportes lisos y con Sikadur® -330 para soportes rugosos, de acuerdo a las diferentes características de cada uno de ellos. Se puede hacer usando un rodillo o brocha. Si es necesario aplicar una

segunda capa de la resina de imprimación, se hace después de que la primera capa haya penetrado en el hormigón.



Figura 6.20: Aplicación de adhesivo epoxi [12].

- Se impregna el tejido con Sikadur® -300 manualmente o bien usando un saturador. El consumo de la resina estará aproximadamente entre 0,4 – 1,0 Kg/m², dependiendo del tipo de tejido.



Figura 6.21: Impregnación manual con adhesivo epoxi [12].

Método Manual

Se distribuye 2/3 del consumo de resina esperado sobre una lámina de polietileno (o algún material no absorbente) y se coloca el tejido ya cortado en sus dimensiones correspondientes sobre ella. Se satura el tejido en resina pasando un rodillo en la dirección de las fibras. Se distribuye el tercio restante de la resina epoxi sobre el tejido y se vuelve a pasar el rodillo por encima.

El consumo de la resina se puede comprobar pesando el tejido antes y después de la impregnación. Para facilitar la aplicación del tejido sobre el soporte y a la vez escurrir el exceso de resina del tejido, se enrolla el tejido en dos listones de madera.



Figura 6.22: Impregnación del tejido en resina y enrollado en los listones de madera [12].

Método Mecánico con el saturador

El equipo debe estar situado en un área bien ventilada e iluminada. El montaje del saturador se debe supervisar y chequear por la persona correspondiente según las indicaciones del fabricante. Se deben seguir las instrucciones del fabricante para el correcto montaje y calibración del mecanismo. Los rodillos se deben calibrar para la saturación del tejido con el correcto consumo de resina.



Figura 6.23: Impregnación mecánica con adhesivo epoxi [12].

El procedimiento de saturación escapa a los alcances de este trabajo, pero se puede conocer fácilmente.

- El tejido pre-humectado se extiende sobre la superficie previamente impregnada con resina, se estira con la mano hasta eliminar pliegues y crestas. Después del alisado y la colocación, el tejido se debe laminar sobre el soporte utilizando un rodillo impregnador de plástico. Se debe pasar el rodillo sobre el tejido paralelo a la dirección de las fibras hasta

que la resina se distribuya uniformemente sobre el tejido y se elimine el aire ocluido. Se deberá evitar hacer una excesiva fuerza para no provocar pliegues y crestas en el tejido.



El solape debe hacerse en la dirección de la fibra y debe ser mayor a 100 mm (dependiendo del tipo de tejido) o lo que se especifique en el proyecto.



Figura 6.24: Aplicación del tejido pre-humectado (arriba y abajo)[12].

Si se requieren capas adicionales se repetirá el proceso de impregnación y laminación. Debido al peso de los tejidos del método húmedo, se recomienda realizar las capas adicionales con un tiempo de espera mínimo de 12 horas (a 23 °C), de esta manera se evita el desplazar el tejido de la capa previa de su posición. La cantidad adicional de resina adhesiva a aplicar la siguiente capa dependerá del tipo de tejido.

Para la colocación de las capas adicionales, se deberá repetir el proceso de laminación. Se recomienda seguir las instrucciones del fabricante con respecto al tiempo abierto de la resina.

- Si se desea se puede aplicar sobre la superficie del tejido de fibras un recubrimiento cementoso o pinturas, placas de protección, morteros, que pueden mejorar la resistencia a altas temperaturas. Para esto se debe aplicar una capa adicional de resina de aproximadamente $0,3 \text{ Kg/m}^2$ y aun en estado fresco espolvorear arena que actuará como superficie de agarre para el recubrimiento posterior. Si se va a recubrir con una pintura, la superficie fresca de la resina se puede alisar con una brocha.



Figura 6.25: Aplicación de recubrimiento [12].

6.4.8 Mezclado de la resina epoxi

Valen las detallado en la sección 6.2.6.



Figura 6.26: Mezclado de la resina [12].

6.4.9 Recubrimiento con pintura

El tejido aplicado y curado puede ser revestido con pinturas por motivos estéticos o de protección. La selección dependerá de los requerimientos a cumplir. Se recomienda seguir las instrucciones del fabricante con respecto a los tiempos de espera antes del revestimiento.

6.4.10 Curado

Se deberá proteger el tejido colocado de la lluvia, arena, polvo y otros contaminantes durante al menos 24 horas después de la aplicación.

6.4.11 Inspección

Para completar el proceso de curado del sistema instalado se comprobarán las áreas donde la resina de impregnación no haya penetrado o donde la resina no haya curado completamente. Si estas áreas cubren más de 25 x 25 mm del área de la superficie, se inyectará resina para restablecer la adherencia y para la aprobación del ingeniero proyectista.

Todas las reparaciones estarán sometidas a la misma aplicación, curado y especificaciones de control de calidad como en los trabajos originales. Se recomiendan los siguientes tipos de reparación:

- Para pequeñas delaminaciones y burbujas, inyectar con un sistema epoxi compatible.
- Si los defectos son grandes, puede ser necesaria la aplicación de capas adicionales de refuerzo de PRFC. La preparación de los trabajos, número de capas adicionales y la longitud de solape deben ser especificadas por el ingeniero.

6.5 Aplicación de los sistemas de PRFC

En este apartado se intentará mostrar los casos en los que muchas veces, la solución más viable a un problema en particular puede ser la aplicación de un refuerzo estructural con PRFC. Es de destacar este material de construcción para la obra dada su simple ejecución y su bajo peso, lo que favorece naturalmente su puesta en obra, además de sus superiores propiedades mecánicas, como ya se ha explicado.

Estéticamente tiene muchas ventajas, ya que es un sistema que envuelve al elemento estructural, casi sin incrementar su volumen o reducir espacios. A su vez, existe la posibilidad y de hecho es lo más recomendable, de aplicar resinas y protectores de terminación sobre el refuerzo ya colocado, para mejorar sus propiedades y durabilidad, mejorar su tolerancia a altas temperaturas, por ejemplo para la luz solar e incendios.

A continuación se verán los distintos casos de aplicación con los diferentes tipos de refuerzo más en detalle y se contrastará también la información señalada en este último párrafo.

6.5.1 Defectos del proyecto o de la ejecución del mismo

6.5.1.1 Dimensiones insuficientes de los elementos estructurales

En este caso, se hormigonaron vigas con una sección insuficiente de hormigón, y como solución al problema se utilizó el proceso en seco, mediante la colocación láminas de PRFC del sistema Sika® Carbodur®[11].



Figura 6.27: Refuerzo con láminas de PRFC en seco en vigas de dimensiones insuficientes [11].

6.5.1.2 Cuantía insuficiente o armadura mal colocada

En estos casos es habitual agregar una lámina metálica en la parte inferior de una viga o un encamisado metálico en una columna. Otra opción sería, como antes, colocar láminas de PRFC del sistema Sika® Carbodur® o similar, con las ventajas mencionadas que puede traer este sistema [11].



Figura 6.28: Refuerzo con láminas metálicas vs. láminas de PRFC en vigas de cuantía insuficientes [11].

6.5.1.3 Materiales de baja calidad o resistencia menor a la especificada.

En los casos donde se ha determinado que la resistencia característica del hormigón utilizado ha resultado menor a la de diseño, y no sea conveniente o ya no sea viable la demolición del elemento estructural, es posible reforzar los elementos estructurales comprometidos mediante alguno de los sistemas vistos [11].



Figura 6.29: Estructura con columnas del primer piso hormigonadas con hormigón de baja resistencia [11].



Figura 6.30: Refuerzo con encamisado metálico vs. sistema SikaWrap de PRFC [11].

6.5.2 Incrementos de cargas

6.5.2.1 Incrementar la capacidad de carga en columnas, losas y vigas

En algunos casos se requiere aumentar la capacidad de una cierta estructura en un espacio determinado, para lo cual debe ser necesario el refuerzo de columnas, vigas y la losa del espacio considerado. Para esta situación es posible reforzar las columnas con algún método conocido o con el sistema SikaWrap® o similar por un lado, y luego reforzar las vigas y losas con el sistema Sika Carbdur® o similar. Cabe recordar, que el proceso húmedo se realiza con los tejidos de SikaWrap® por ejemplo, y para el proceso en seco se utilizan las láminas Sika Carbdur® o similares en cada caso [11].



Figura 6.31: Refuerzo de vigas de gran luz y losas casetonadas para aumentar su capacidad de carga [11].

6.5.2.2 Incrementar la capacidad de puentes para soportar un aumento de cargas axiales

Este es uno de los usos más habituales de estos sistemas en el medio, y hay varias experiencias en el mundo que demuestran los beneficios que los mismos tienen.

Por ejemplo, este a continuación es uno de los primeros puentes reforzados de Nueva Zelanda; fue construido en 1910 y en el año 2007 se encargó el trabajo de reforzamiento del mismo para poder adecuarse al proyecto que requería soportar un movimiento de 1500 cruces de colectivos, lo que significaba un incremento de cargas considerable [35].



Figura 6.32: Refuerzo de puente para aumentar su capacidad de carga [35].



Figura 6.33: Primera aplicación de un sistema de PRFC en Latinoamérica. Puente Cocorná, Colombia [11].

6.5.2.3 Instalación de maquinaria pesada

Esto involucra una sobrecarga muchas veces no prevista y la necesidad de reforzar la estructura para soportar las solicitaciones requeridas.

6.5.3 Renovar estructuras antiguas

6.5.3.1 Falta de conocimiento de la capacidad resistente real de la estructura



Figura 6.34: Chimenea U.Distrital- Bogotá [11].

6.5.3.2 Envejecimiento de los materiales con pérdida de sus características iniciales



Figura 6.35: Refuerzo en estructuras debilitadas [11].

6.5.4 Cambios en la propia forma de la estructura

6.5.4.1 Apertura de huecos en muros, losas

Este sistema tiene la ventaja de poder ser utilizado en espacios reducidos, modificando el sistema estructural para la apertura de huecos en muros o losas.



Figura 6.36: Apertura de losas para ascensores y escaleras mecánicas [11].

6.5.5 Daños en la estructura

6.5.5.1 Impactos sobre la estructura

Es necesario reforzar las columnas de puentes sobre un camino para protegerlas ante posibles impactos de vehículos. Entre las variadas soluciones es posible realizar un refuerzo de las columnas con tejidos de PRFC mediante la vía húmeda.

6.5.5.2 Incendios

Estos sistemas son muy aptos en situaciones extremas. En cámaras de fuego y siguiendo la normativa ISO, casi no generan humo durante el periodo de ensayo. Las laminas no tienen que ser protegidas ante la posibilidad de caída dado su bajo peso, además, pueden ser protegidas exteriormente.

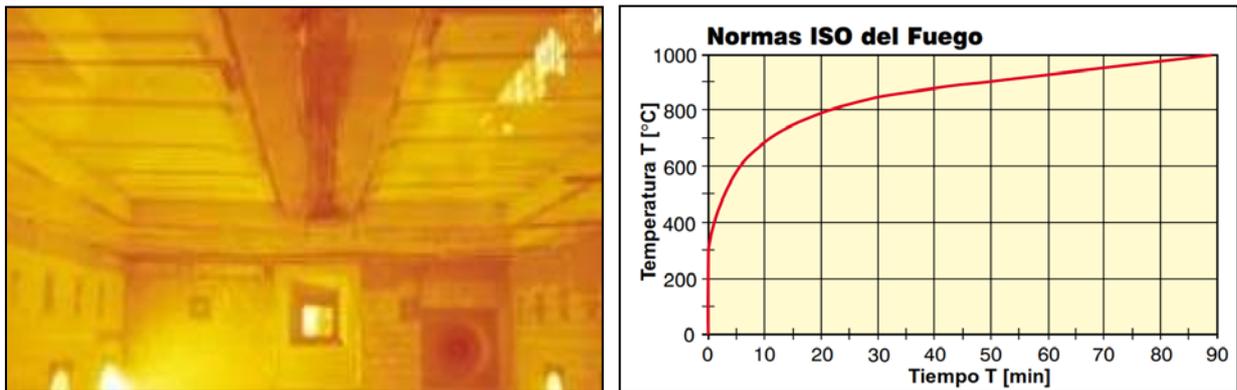


Figura 6.37: Ensayo en cámara de fuego [11].

6.5.5.3 Corrosión y pérdida de sección de las armaduras del hormigón



Figura 6.38: Refuerzo en secciones debilitadas [11].

6.5.5.4 Actividad sísmica



Figura 6.39: Edificio de departamentos con muros de hormigón armado [11].



Figura 6.40: Refuerzo de los muros con el sistema SikaWrap y Carbodur [11].

6.5.6 Mejorar las condiciones de servicio actuales

6.5.6.1 Disminución en las deformaciones y flechas, utilizando laminados de alto módulo elástico

Al reforzar un elemento estructural con laminados de alto modulo elástico, se consigue aumentar la rigidez del dicho elemento y disminuir las deformaciones y flechas.

6.5.6.2 Disminución de la abertura de fisuras

Otra solución muy común para evitar el avance de fisuras por esfuerzos de tracción en el hormigón es instalar estos tejidos de PRFC con el proceso húmedo a modo de coser las fisuras y evitar que se sigan desarrollando mediante el refuerzo de la zona debilitada. En puentes puede existir el problema que debido a una incorrecta consideración de cargas o un incorrecto refuerzo, los altos esfuerzos de corte en los apoyos produzcan fisuras de corte en los tramos a aproximadamente 45°, como fue el caso de este puente en Colombia mostrado a continuación:



Figura 6.41: Refuerzo para impedir el avance de fisuras en el Puente Pumarejo, Colombia [36].

En otras estructuras más simples, es común que también aparezcan fisuras en el hormigón, y en muchos casos es necesario cortar el avance de las mismas.



Figura 6.42: Refuerzo para impedir el avance de fisuras en tabiques y losas [11].

En la siguiente imagen se puede apreciar la diversidad de aplicaciones que tienen estos sistemas:

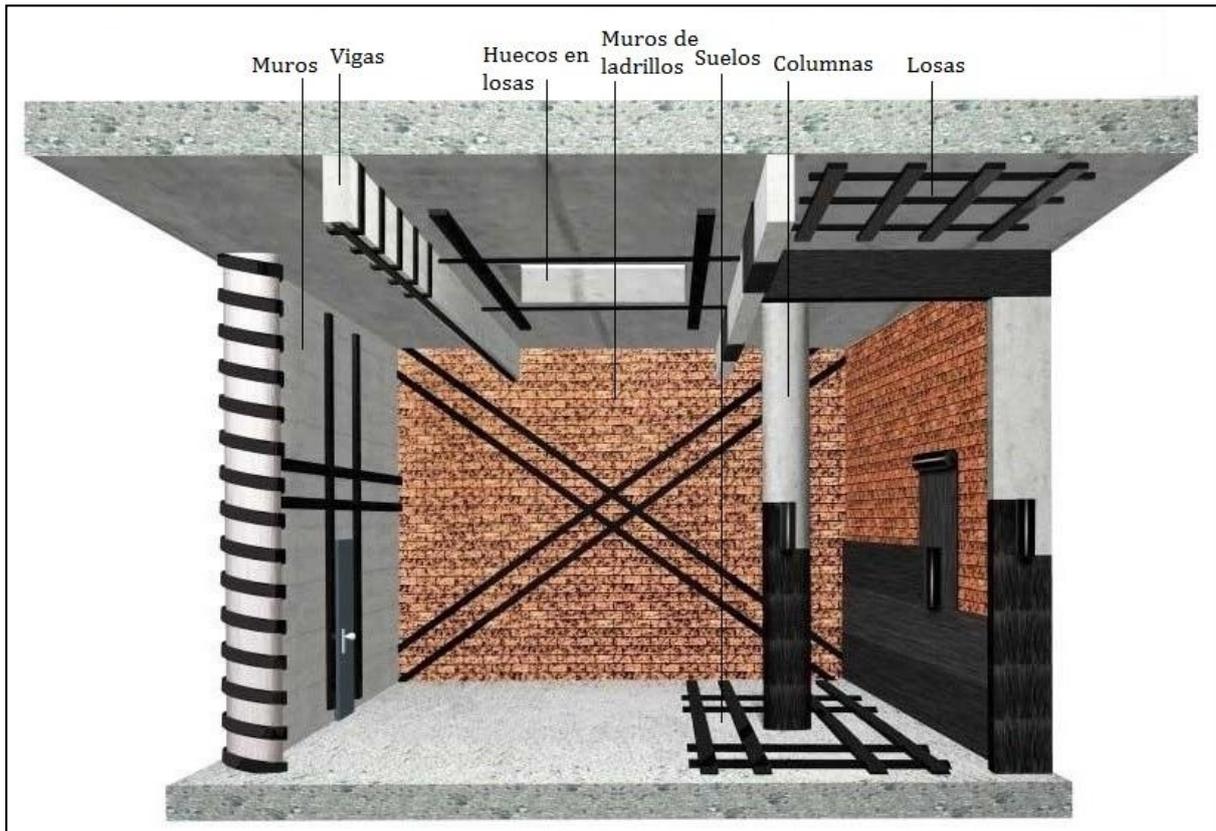


Figura 6.43: Refuerzo esquemático en distintos elementos [11].

6.6 Esfuerzos solicitantes que pueden presentarse

Como se pudo apreciar en el apartado anterior, el campo de aplicación de estos refuerzos estructurales de PRFC es muy amplio, y puede ser aplicado en función de la necesidad particular de cada elemento estructural a modo de soportar los siguientes tipos de esfuerzos:

- Flexión
- Corte
- Refuerzo al Confinamiento
- Refuerzo de muros
- Sismos

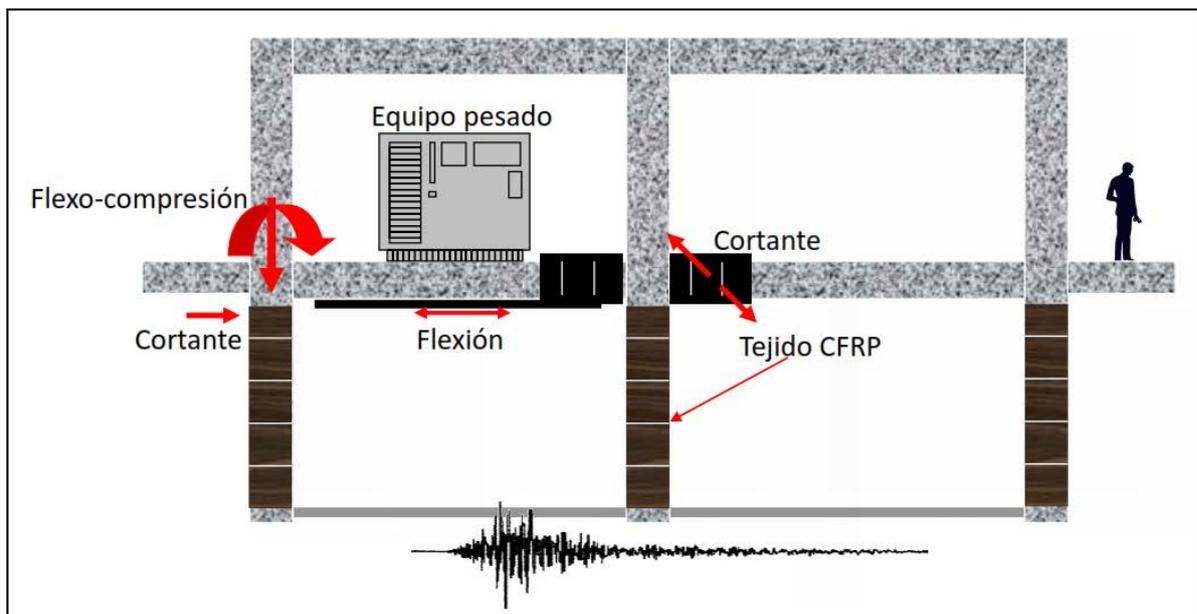


Figura 6.44: Esfuerzos en una estructura sometida a cargas verticales y de sismo [11].

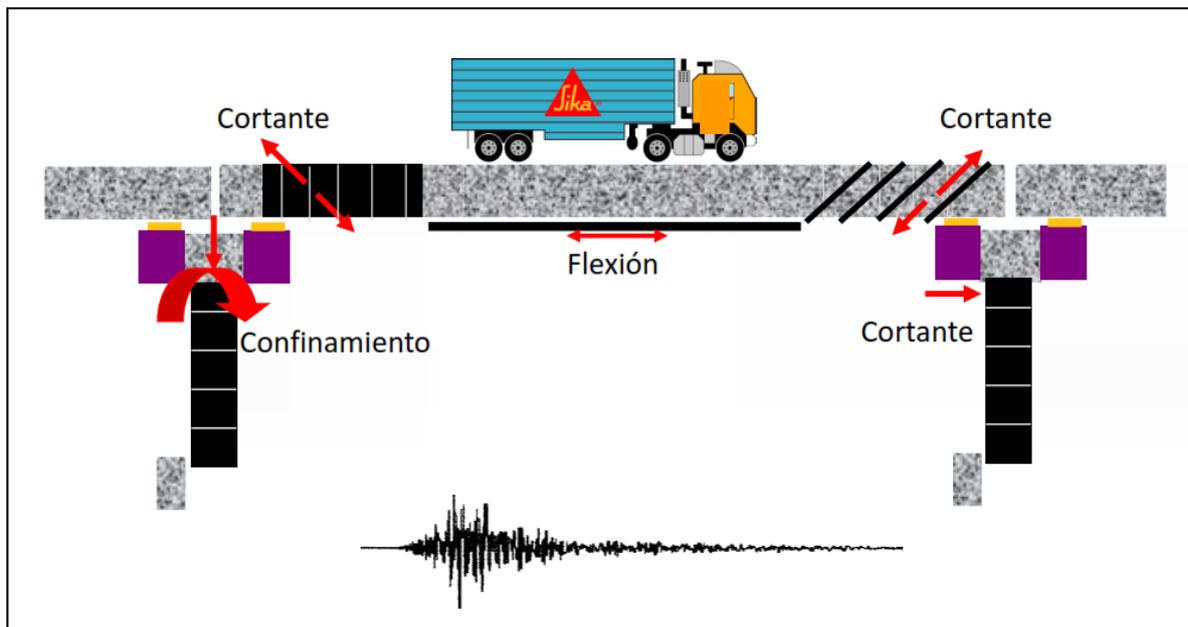


Figura 6.45: Esfuerzos en una estructura sometida a cargas verticales y de sismo [11].

Ahora se abordara cada tipo de refuerzo más detalladamente en función del esfuerzo que deba soportar.

6.6.1 Refuerzo a flexión

Para el refuerzo de flexión de vigas, viguetas, losas y otros elementos de hormigón armado se utiliza, principalmente, el método de pegado de láminas rectas de fibra de carbono sobre la cara traccionada. En algunos casos también se podría utilizar el método de pegado de tejidos. En ambos casos, el sistema consiste en adherir el refuerzo que actuará como armadura externa de tracción. El adhesivo servirá para transmitir el esfuerzo cortante entre el refuerzo y el hormigón [13].

Cabe destacar que la impresión general es que los refuerzos PRFC no se deben utilizar como refuerzo a compresión. El módulo de elasticidad a compresión de los sistemas FRP es, en general, inferior que a tracción. Por otro lado, las configuraciones típicas de sistemas de refuerzo externo tienen una rigidez muy baja a la flexión, de modo que se puede producir un pandeo local con relativamente bajos niveles de tensión. Sin embargo, en ciertos casos el PRFC puede ser sometido a tensiones de compresión que pueden ser de una importancia secundaria pero no despreciable. Como por ejemplo, su aplicación en columnas y en casos de vigas y losas, refuerzos de momentos negativos en la cara superior del elemento que se extienden hasta regiones de momentos positivos [13].



Figura 6.46: Trabajos para reforzar una viga [12].



Figura 6.47: Trabajos para reforzar una losa [12].

En primer lugar, los laminados de fibra de carbono se colocan sobre la cara inferior de la viga, en el tramo central del vano. En este caso, el refuerzo se realiza sobre el tramo de momentos positivos de la viga. En segundo lugar, se observa el refuerzo sobre la cara superior de una losa en las cercanías a los apoyos. Se trata de un refuerzo de armado sobre los momentos negativos de la losa.

6.6.2 Refuerzo de corte

Para el refuerzo de piezas sometidas a corte lo que se hace es colocar las fibras de carbono como estribos externos pegados con la resina epoxi. Para realizar este tipo de refuerzo se pueden utilizar tanto el sistema de tejidos como el de laminados preconformados en forma de "L" [12] o mediante láminas sobre los laterales a 45° de ser posible o bien verticales.

6.6.3 Refuerzo al confinamiento

Para elementos sometidos a compresión simple o compuesta se puede hacer un refuerzo por confinamiento. Este tipo de refuerzo se hace principalmente en columnas. El sistema a utilizar es el de tejidos, debido a su fácil adaptabilidad a cualquier forma del elemento.

Con los tejidos se envuelve completamente la pieza a reforzar, de abajo hacia arriba. Se le pueden poner tantas capas de tejido como se desee. Esta envoltura provoca un confinamiento de la pieza que mejora su comportamiento frente a las cargas. Cuando la pieza se comprime, se acorta, y por el efecto Poisson se dilata transversalmente. El objetivo del confinamiento es controlar esta dilatación transversal, mejorando así la capacidad portante.



Figura 6.48: Confinamiento realizado en combinación de los dos métodos (vía húmeda y vía seca) [11].

Lo que se busca es envolver exteriormente con el tejido los elementos verticales que trabajan a compresión, mejorando la capacidad portante del elemento mediante el control de la dilatación transversal. El proceso de ejecución del confinamiento puede

realizarse por vía húmeda o vía seca, o con una combinación de ambos, aunque el método por la vía húmeda es la más eficiente.

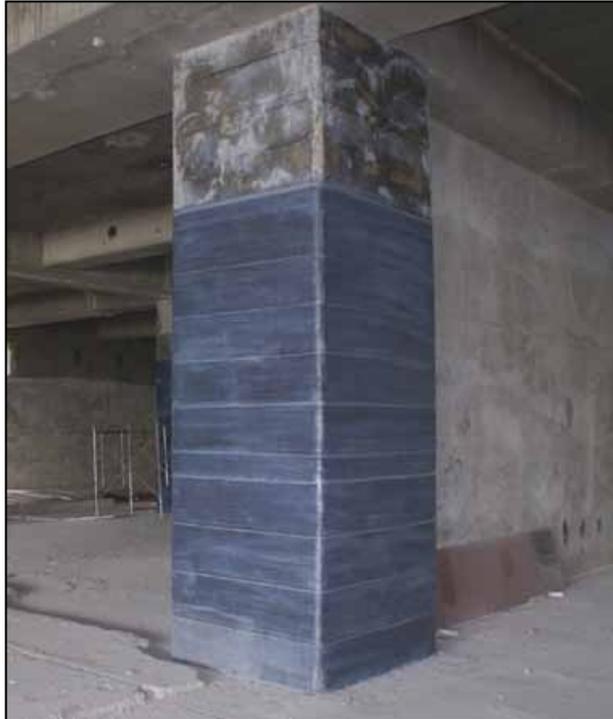


Figura 6.49: Confinamiento realizado con SikaWrap [37].

6.6.4 Refuerzo de muros

Otro tipo de refuerzo, quizás menos usual, es el de muros, tanto de ladrillos como de hormigón. Estos muros pueden estar sometidos a fuerzas longitudinales (cargas sísmicas, de viento) o cargas verticales (gravitatorias). Con el sistema de pegado de tejidos mediante la unión del tejido con la superficie, se logra mejorar la capacidad portante de los muros contra cualquiera de las cargas indicadas anteriormente.



Figura 6.50: Refuerzo de muros [11].



Figura 6.51: Refuerzo de muros [11].

Se han podido observar las diferentes aplicaciones de los refuerzos mediante sistemas adheridos externamente a los elementos de hormigón armado, tanto de vía seca como húmeda, en función de los esfuerzos a los que están sometidos.

6.7 Análisis de precios. Comparación

En este apartado se comparará el costo de realizar el refuerzo estructural de las vigas de un puente con dos alternativas:

1) Reforzando las vigas con una capa externa de hormigón armado anclado a las vigas existentes, aumentando la sección de las mismas y su capacidad resistente,

2) Reforzando las vigas con el sistema Sika Carbodur® S1012 tanto a flexión como a corte;

Y luego se analizará el costo de reforzar una viga típica de H°A° para soportar una mayor carga.

6.7.1 Refuerzo de un puente. Esquema estructural

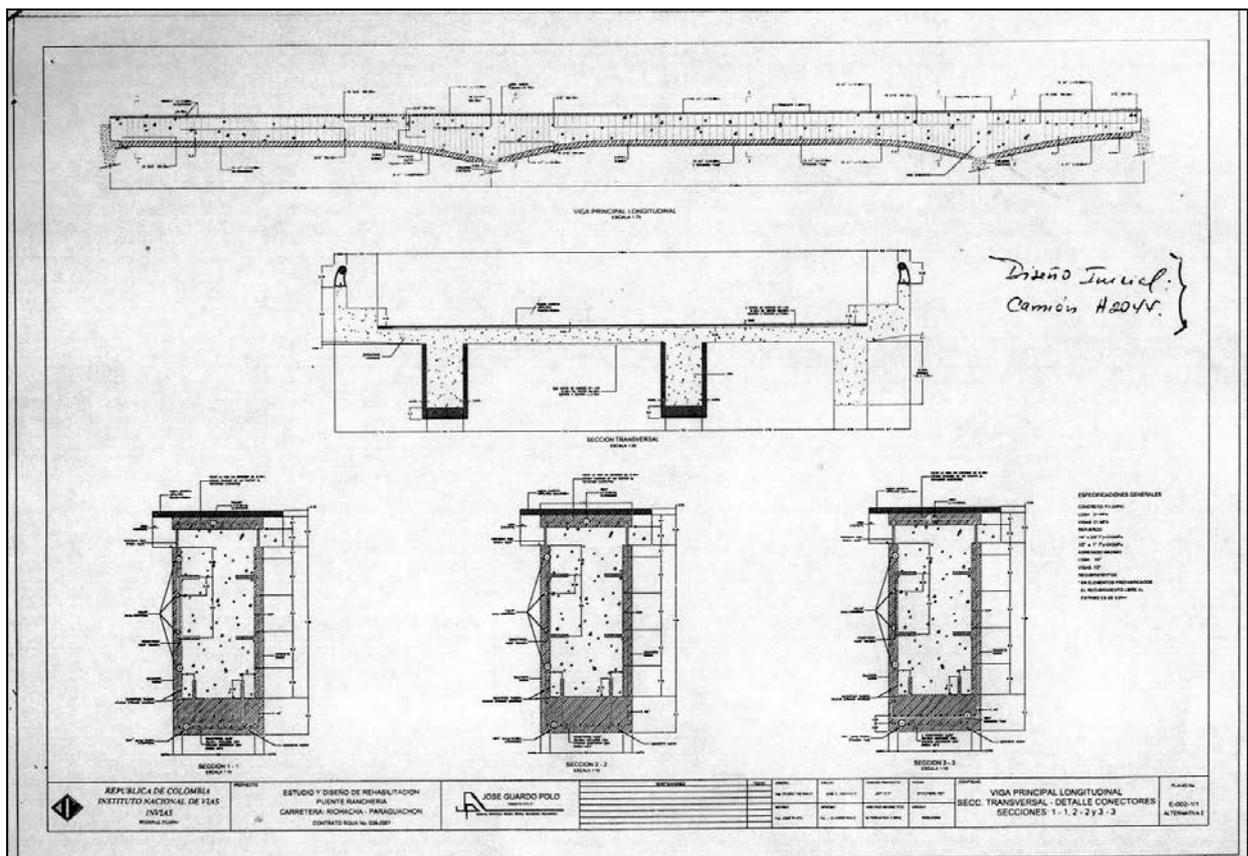


Figura 6.52: Plano del esquema estructural del puente [11].

6.7.2 Vistas del puente con el refuerzo terminado

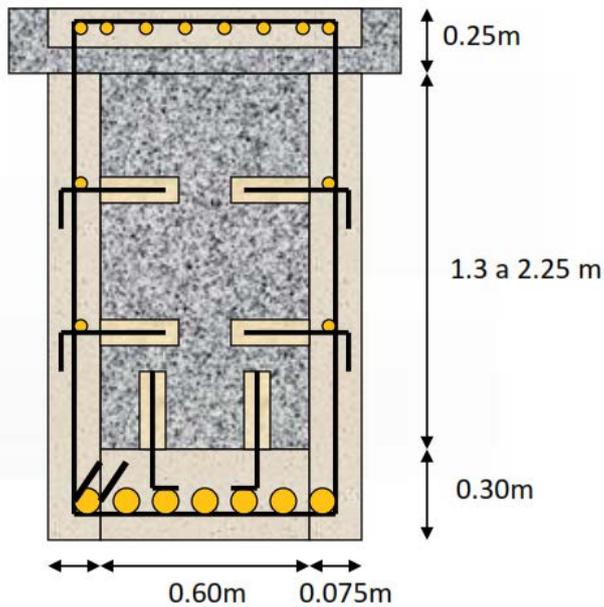


Figura 6.53: Vista lateral del puente con el refuerzo terminado [11].

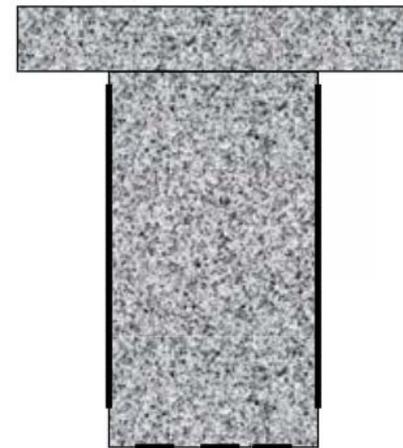


Figura 6.54: Vista lateral – inferior del puente con el refuerzo terminado [11].

6.7.3 Alternativas de refuerzo estructural



Alternativa con hormigón armado



Alternativa con Sika Carbodur S1012

6.7.4 Comparación de costos

Análisis de costos (US\$)				
Ítem	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Hormigón	m ³	50,00	\$ 250,00	\$ 12.500,00
Acero	kg	15.700,00	\$ 4,50	\$ 70.650,00
Formaleta	ml	57,00	\$ 25,00	\$ 1.425,00
Adh. p/pegar hormigón	kg	100,00	\$ 15,50	\$ 1.550,00
Anclajes	u	2.000,00	\$ 10,20	\$ 20.400,00
Mano de obra	gl	1,00	\$ 15.500,00	\$ 15.500,00
Total				\$ 122.025,00
Ítem	Unidad	Cantidad	Precio	Total
Sika Carbodur S1012	ml	390,00	\$ 70,70	\$ 27.573,00
Sikadur 30	kg	390,00	\$ 23,20	\$ 9.048,00
Mano de obra	gl	1,00	\$ 9.150,00	\$ 9.150,00
Total				\$ 45.771,00

Cabe mencionar que se tomaron valores reales de materiales de Sika Colombia y mano de obra de ese país. La comparativa de costos busca dar valores de referencia. Además del posible beneficio económico, existen otros beneficios quizás más importantes, como la rapidez de ejecución, el camuflaje del refuerzo dentro de la estructura sin cambiar el sistema estructural, entre otros.

6.7.5 Refuerzo de una viga de H°A°

Ante la necesidad de reforzar una viga para soportar una mayor carga, se analiza el refuerzo y el costo de materiales para ejecutar esta tarea.

Se tiene una viga de sección rectangular, de 600 x 200 mm y 8,00 m de largo, armada con 4 barras $\phi 16$ mm ($A_s = 804$ mm²) y estribos $\phi 6$ mm c/20 cm que le proveen un momento resistente de 154 kN.m. Las cargas externas generan bajo las nuevas condiciones de carga, un momento flector debido a las cargas muertas (sin mayorar) de 35 kN.m y debido a las cargas vivas (sin mayorar) de 80 kN.m, de manera tal que el momento último M_u sin reforzar es de 170 kN.m.

Se puede observar la necesidad de reforzar la viga para satisfacer la condición básica de resistencia que no se cumple:

$$\phi \cdot M_n = 154 \text{ kN.m} \geq M_u = 170 \text{ kN.m} \quad (1)$$

En este caso se opta por reforzar la viga con una lamina de PRFC Sika Carbodur® S512 (50 mm de ancho y 1,2 mm de espesor, $A_f = 60$ mm²) de una resistencia última a tracción $f_{fu} = 2800$ MPa y modulo de elasticidad $E_f = 160000$ MPa. El esfuerzo de rotura limite por "Creep" es de 0,55 del f_{tu} y el factor de reducción adicional Ψ_f es de 0,85. Se supone que la viga se encuentra en un ambiente interior, por lo tanto se aplica un factor de reducción por exposición ambiental C_e de 0,95.

De acuerdo a esto y según el procedimiento detallado en la sección 5.3.8, siguiendo la reglamentación de la norma ACI, se determina el nuevo momento resistente con el refuerzo incluido y se verifica la condición (1) que, como se puede ver, ahora si verifica:

$$\phi \cdot M_n = 171 \text{ kN.m} \geq M_u = 170 \text{ kN.m}$$

La información adicional que se puede determinar es que el tipo de rotura es por falla del PRFC.

6.8 Notas finales

Es importante destacar que el método de instalación NSM (montado cerca de la superficie) tanto con barras de PRFC incrustadas en el hormigón endurecido, como también con mallas de fibras de carbono para refuerzo con el hormigón en estado fresco, si bien tienen sus ventajas sobre los otros métodos, no son los más utilizados, mucho menos la segunda variante. Este trabajo abarca más que nada los otros dos métodos, ya que son los más utilizados y cuyos productos se comercializan en nuestro país, en cambio, no se venden por ejemplo las mallas de fibras de carbono para reforzar hormigón en estado fresco.

Hasta ahora hemos visto casos de aplicación en diferentes obras en distintos lugares del mundo, y a continuación analizaremos la situación actual en nuestro país, en los que respecta a obras realizadas con estos sistemas de PRFC.

Capítulo 7

EXPERIENCIAS EN ARGENTINA

7.1 Introducción

En este apartado se verán las aplicaciones con sistemas de refuerzo de PRFC en diferentes proyectos realizados en nuestro país. De acuerdo a la información que se pudo recabar en cuanto a la situación actual, es importante mencionar y dejar en claro que estos productos son actualmente muy buscados en la Argentina, y que rápidamente quedan sin stock. Sika Argentina no es la única empresa que los comercializa, hay otros importadores que los distribuyen, pero si es la única que brinda un servicio integral además del respaldo con el que el cliente cuenta.

A continuación se describirán cuatro proyectos en los cuales Sika Argentina asistió, donde se utilizaron los distintos productos y métodos de instalación que se describieron en este trabajo.

7.2 Refuerzo estructural del Banco Multinacional en Tierra del Fuego, Argentina

7.2.1 Descripción del proyecto

Se trata de un banco multinacional ubicado en la provincia de Tierra del Fuego, al sur de la Argentina, lo que lo convirtió en el refuerzo estructural realizado con Sika Carbodur® más austral de mundo.

Debido a la necesidad de incorporar un nuevo sector de cajas de seguridad, aumentando la carga para la que fue diseñada la estructura, se vio necesario reforzar la estructura existente [38].

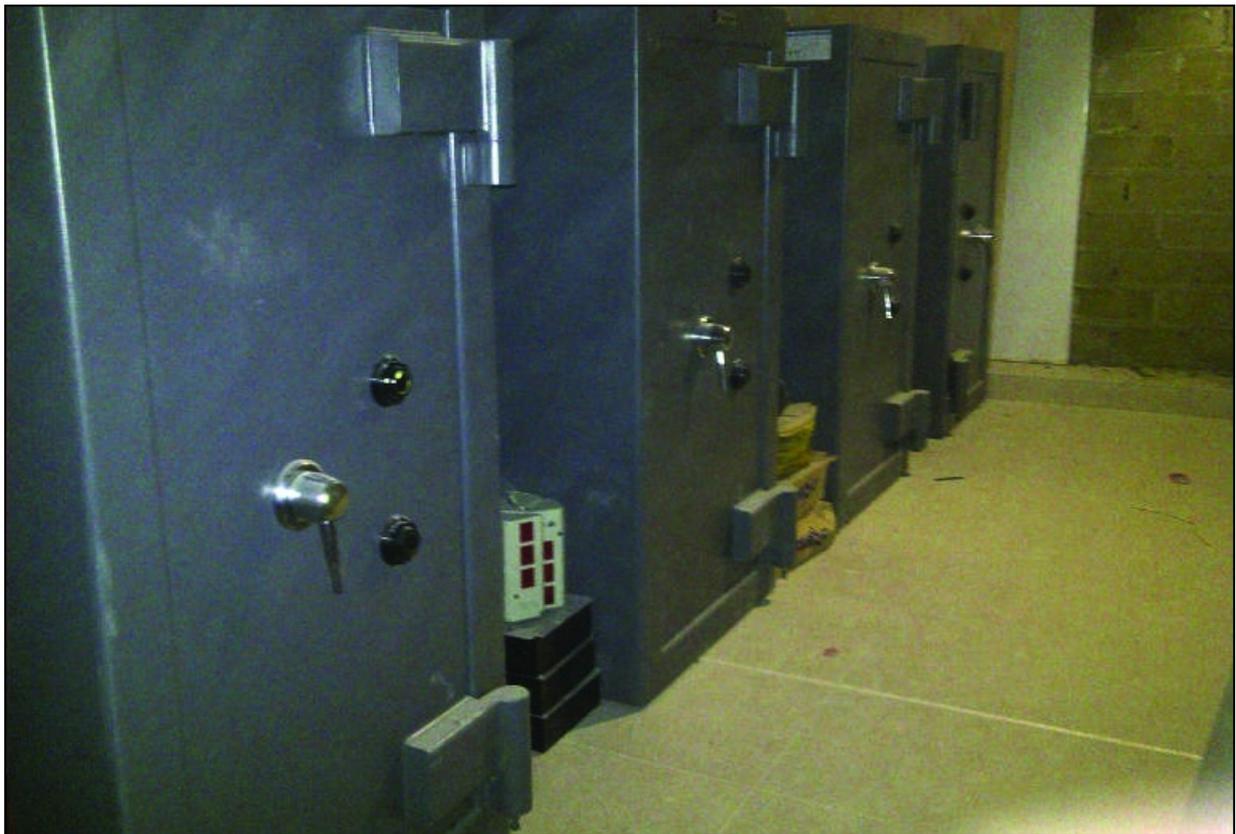


Figura 7.1: Aumento en las sobrecargas sobre una losa [38].

7.2.2 Requerimientos del proyecto

Refuerzo estructural por modificación de uso de la estructura.

7.2.3 Soluciones Sika

Luego de preparada la superficie a tratar, y evitando las imperfecciones del sustrato, se procedió a colocar el Sikadur® 30 + Sika Carbodur® S 512 / S 1012 de acuerdo al diseño estructural previamente realizado.

En total se colocaron 100 metros lineales de láminas de PRFC Sika Carbodur® S1012 (100 mm de ancho y 1,2 mm de espesor) y 20 ml de Sika Carbodur® S512 (50 mm de ancho y 1,2 mm de espesor). Como adhesivo epoxi se utilizaron 110 kg de Sikadur® 30 [38].



Figura 7.2: Refuerzo de losa con laminas de PRFC [38].

7.2.4 Participantes del proyecto

Dueño: Banco Multinacional

Contratista: Sosa Fueguina S.A.

7.3 Refuerzo estructural del Hotel Internacional 5 estrellas en Recoleta, Argentina

7.3.1 Descripción del proyecto

Se trata de un Hotel 5 estrellas de la Ciudad de Buenos Aires, en el que debido a algunas modificaciones en el diseño y en la utilización de salones en el mismo se decidió aumentar su capacidad de carga mediante un refuerzo estructural que pueda ser instalado con rapidez y sin afectar el aspecto estético de los salones de fiesta [39].



Figura 7.3: Refuerzo de vigas con tejidos de PRFC [39].

7.3.2 Requerimientos del proyecto

Refuerzo estructural por modificación de uso de la estructura.

7.3.3 Soluciones Sika

La solución especificada por el Ingeniero estructuralista fue la de reforzar de vigas del salón con el sistema SikaWrap® 103C y el adhesivo epoxi Sikadur® 330. Previamente se realizó la limpieza y preparación de la superficie y en las partes de hormigón dañadas se reparó con mortero epoxi Sikadur® 31 [38].

En total se necesitaron 60 rollos de tejido SikaWrap® 103 C de PRFC, lo que corresponde a un total de 580 metros lineales de tejido, 600 kg de adhesivo epoxi impregnante Sikadur® 330, y 120 kg del mortero estructural para reparación Sikadur® 31.



Figura 7.4: Aplicación del tejido SikaWrap® 103C [39].



Figura 7.5: Aplicación del adhesivo Sikadur® 330 [39].



Figura 7.6: Vista de las vigas reforzadas [39].

7.3.4 Participantes del proyecto

Dueño: Hotel 5 Estrellas

Contratista: Coplanar S.A.

Proyectista: Ing. Adrian Comelli.

7.4 Refuerzo estructural de Salón de ventas, Zona Norte, Argentina

7.4.1 Descripción del proyecto

Se trata de un Supermercado en el cual la estructura existente debió ser reforzada para cumplir con nuevas condiciones de carga debido a modificaciones en sus almacenes y la disposición de su planta superior.

Era un condicionante del proyecto que no se debían interrumpir las operaciones de venta durante la realización de la obra.



Figura 7.7: Vista de los refuerzos estructurales realizados [40].

7.4.2 Requerimientos del Proyecto

Rehabilitación y refuerzo de vigas existentes evitando la suspensión de las tareas de venta sumado a las necesidades de una rápida habilitación y puesta en funcionamiento de la estructura [40].

7.4.3 Soluciones Sika

Se realizó el cálculo estructural teniendo en cuenta las nuevas condiciones de sobrecargas de la estructura. La solución adoptada consistió en un sistema de refuerzo con fibras de carbono (PRFC) combinando 2 productos: Sika Carbodur® S512 y SikaWrap®. De esta manera se logró la verificación en tramos y apoyos de las vigas comprometidas en el nuevo esquema de cargas [40].

En total se aplicaron 270 metros lineales de Sika Carbodur® S512 con 130 kg de adhesivo epoxi Sikadur® 30 y 50 m² de tejidos SikaWrap® 103C con 85 kg de adhesivo epoxi Sikadur® 330/300 [40].



Figura 7.8: Vista de los refuerzos estructurales realizados [40].

7.4.4 Trabajos realizados

- Limpieza mecánica de la superficie.
- Preparación de la superficie y productos, limpieza de los mismos.
- Aplicación del sistema Sika Carbodur® S512 + Sikadur® 30 de acuerdo al cálculo estructural.
- Aplicación del sistema SikaWrap® 103 C + Sikadur® 330/300 de acuerdo al cálculo estructural.

En ningún momento se interrumpieron las actividades del salón de ventas durante la colocación de los sistemas de refuerzo estructural.

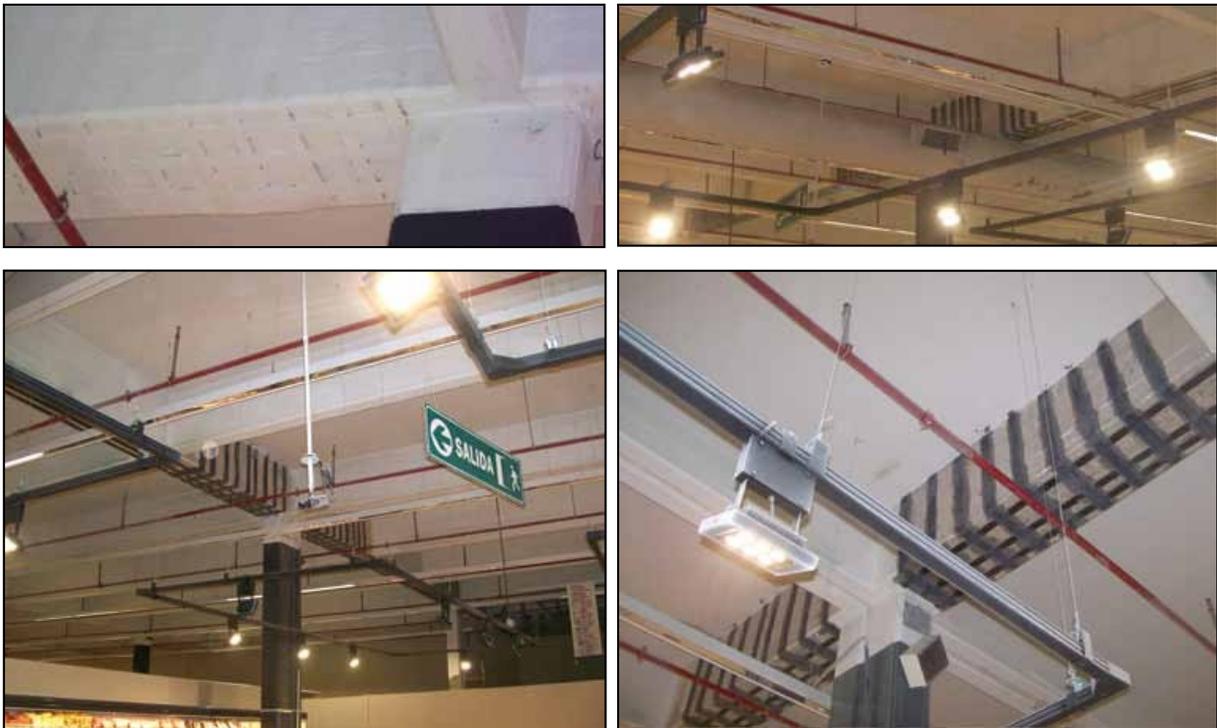


Figura 7.9: Vista de los trabajos realizados [40].

7.4.5 Participantes del Proyecto

Contratista: ABL S.A.

7.5 Refuerzo estructural en Edificio de viviendas, Capital Federal, Argentina

7.5.1 Descripción del proyecto

El proyecto se desarrolló en un edificio de viviendas ubicado en la Ciudad de Buenos Aires, en el cual se realizaron modificaciones durante su construcción que alteraron el esquema de cargas previsto. Esto ocasionó un aumento de cargas en algunas losas.

Un análisis estructural determinó que las losas modificadas no estaban en condiciones de recibir las nuevas solicitaciones impuestas y que debían ser reforzadas o reconstruidas [42].

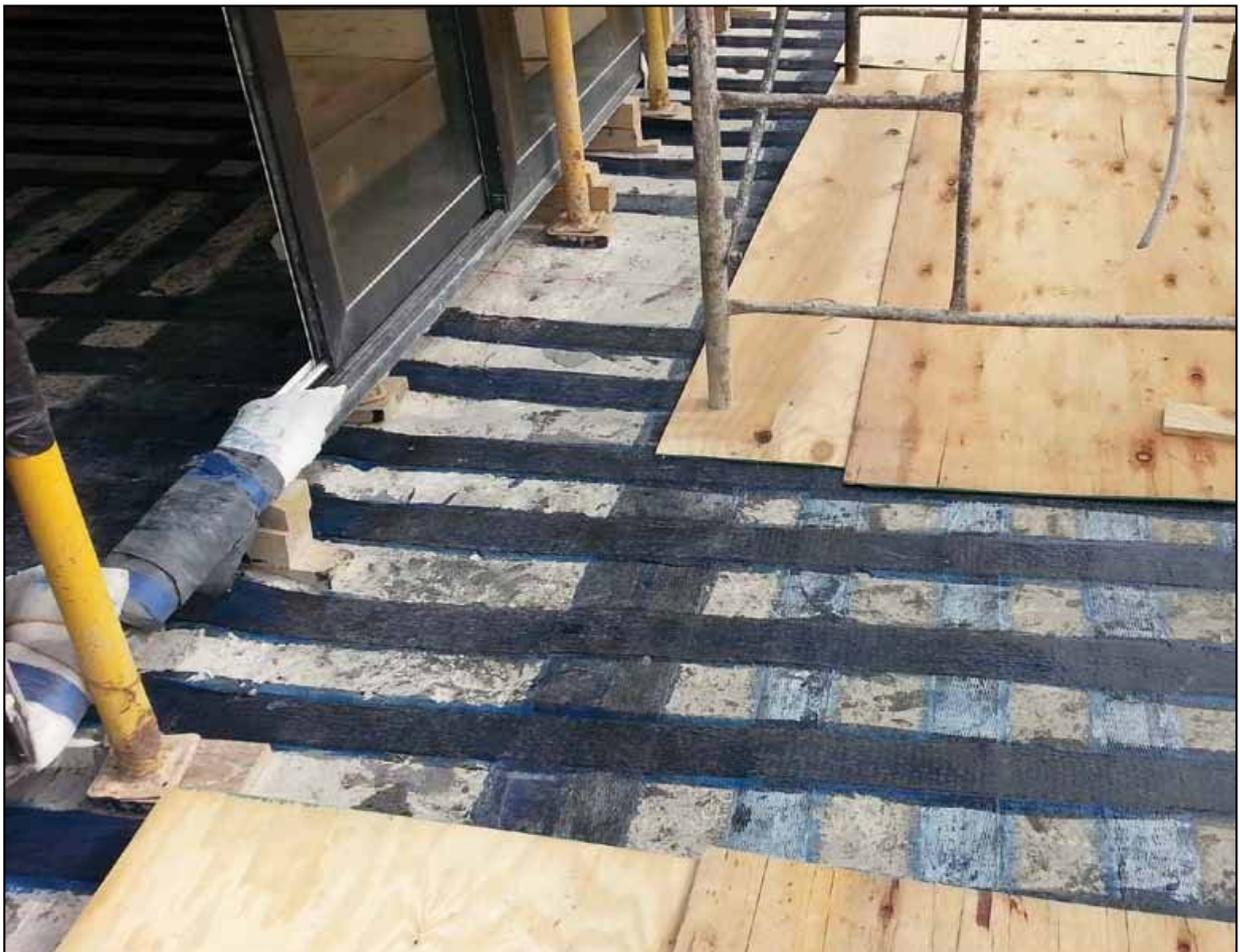


Figura 7.10: Detalle del sistema utilizado [42].

7.5.2 Requerimientos del proyecto

El refuerzo debía cumplir con una serie de condiciones [43]:

- Adaptarse a la geometría de las losas, en las cuales existían ciertos desniveles entre las losas a reforzar.
- Puesta en servicio inmediata.
- No introducir modificaciones que afecten el diseño original de la planta.



Figura 7.11: Vista de losa a reforzar (izquierda) y refuerzo aplicado (derecha) [42].

7.5.3 Soluciones Sika

Para lograrlo el estructuralista utilizó un sistema de refuerzo y rehabilitación estructural que consistió en combinar la capacidad de refuerzo de los tejidos de fibra de carbono (PRFC) SikaWrap® 103C con un adhesivo de impregnación adecuado.

Debido al cambio de niveles en las losas a reforzar, existían en algunas zonas del refuerzo concentración de tensiones, para evitar esto se utilizó Sikadur® 42 CL, grout epoxi con gran fluidez y elevada resistencia que permitió ejecutar las superficies adecuadas de contacto entre la estructura y el refuerzo.

7.5.4 Trabajos realizados

En total se utilizaron 390 m² de tejidos SikaWrap® 103C con el correspondiente adhesivo de impregnación, y se necesitaron 12700 kg de mortero epoxi para grouting Sikadur® 42 CL, para nivelar las losas donde se debía aplicar el refuerzo.



Figura 7.12: Vista del trabajo terminado (izquierda) y detalle sobre el borde de un apoyo (der.) [42].

7.5.5 Participantes del Proyecto

KAM (gerente de cuentas estrategicas): Lic. Luis Alberto Malosetti / Lic. Cristian Rodriguez,

TMD: Mariano Lo Preiato.

Capítulo 8

CONCLUSIONES

En este trabajo se abarca en forma ordenada y lo más completa posible los conocimientos necesarios para lograr una comprensión general de este sistema de refuerzo estructural, cada vez más utilizado tanto en nuestro país como en el resto del mundo. Quizás en nuestro ámbito sea una de las soluciones menos conocidas o aplicadas para situaciones de refuerzo. Esta presentación de los sistemas de fibras de carbono origina las siguientes conclusiones en relación a su uso, aplicación y ventajas para refuerzos estructurales:

- Los materiales compuestos poseen excelentes características estructurales y aun en condiciones ambientales desfavorables brindan una garantía superior en cuanto a durabilidad.
- Se puede afirmar que son materiales sumamente compatibles con el hormigón y es por eso que son una excelente alternativa para ser utilizados como refuerzos en estructuras de hormigón armado.
- Dentro de los distintos materiales compuestos citados, los refuerzos con resinas epoxis reforzados con fibras de carbono resultan ser la mejor solución y por lo tanto, son los más aplicados en estructuras de hormigón armado.
- Tienen excelentes propiedades mecánicas, con tres variantes de modulo elástico, dependiendo del objetivo que se busque.
- Son livianos, no se corroen y casi no ocupan espacio una vez aplicados.
- Por esto último citado, es que los PRFC sobresalen en su puesta en obra. Son muy manejables, se pueden adaptar a la forma de casi cualquier superficie, no se ejecutan juntas, por lo tanto se evitan concentraciones de tensiones o puntos débiles y no reducen espacios ni alturas útiles, pudiendo pasar desapercibido si se utiliza además un recubrimiento.
- Tienen una gran ventaja en ambientes adversos y se pueden utilizar tanto en el exterior como interior. No se corroen como el acero, ni sufren otras patologías por la exposición con agentes químicos. Sin embargo, es importante destacar que no es un material que soporte cargas de fuego, es más, es muy intolerante ante temperaturas apenas elevadas, por lo tanto es recomendable si fuese necesario, proteger el refuerzo con revestimientos ignífugos.
- Desde el punto de vista económico, presentan ventajas en comparación con otras soluciones. Si bien la fibra de carbono es un material que se importa y que tiene un proceso de elaboración que lo hace un material caro, se compensa con la

disminución de costos de mano de obra (menos horas de trabajo), la eliminación de los costos de equipos, las herramientas utilizadas son básicas y no son costosas, y el manejo de los materiales y la puesta en obra es mucho más fácil.

- El costo final es similar o incluso inferior al de otras soluciones de reforzamiento estructural.
- Se han realizado una infinidad de ensayos e informes sobre estos materiales en todo el mundo, se han redactado guías para el cálculo y recomendaciones de diseño para refuerzos en hormigón [1] y [3]. Sin embargo, no se ha elaborado una norma específica para su aplicación. El camino que queda es, por lo tanto, atenerse a las guías y recomendaciones citadas, contar con un ingeniero idóneo en el tema y solicitar el respaldo a las empresas que comercializan el producto para la etapa de proyecto que se necesite.
- Existen ensayos normalizados para la caracterización de las resinas, fibras y del material terminado ya sea el laminado extruido o los tejidos. Sin embargo, no existen ensayos normalizados del sistema de refuerzo. Por lo tanto, se puede recurrir a los métodos de cálculo mencionados o bien utilizar métodos numéricos con elementos finitos, que han demostrado tener un grado de exactitud aceptable en los ensayos estudiados en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fédération Internationale du Béton, FIB. “Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures”, 2001.
- [2] Fédération Internationale du Béton, FIB. “Bulletin 35. Retrofitting of concrete structures by externally bonded FRPs with emphasis on seismic applications”, 2006.
- [3] American Concrete Institute ACI - Committee 440 2R-02. “Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures”, 2008.
- [4] Cavette, Chris. «Carbon Fiber.». How Products Are Made.
- [5] Zoltek. “ How is it made?”.
- [6] Krishan K. Cha. “Composite Materials: Science and Engineering”.
- [7] P.K.Mallick. “Fiber-reinforced composites. Materials, manufacturing and design. Third edition”, 2008.
- [8] Ficha técnica Sika® Carbodur®,
- [9] Ficha técnica SikaWrap® Hex 103 C.
- [10] Ficha técnica Sikadur® 30
- [11] Sika Colombia. “Reforzamiento estructural con materiales FRP”.
- [12] Sika. “Refuerzo estructural con sistemas a base de fibra de carbono”.
- [13] Marco A. Pérez. “Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación”, 2014.
- [14] Norma ASTM D3379-75.
- [15] Norma ASTM D3822-96.
- [16] Norma ASTM D638M-844.
- [17] Norma ASTM D3800-79
- [18] Norma ASTM D3171-76
- [19] Norma ASTM D3039
- [20] Norma ASTM D3410
- [21] Norma ASTM D790

[22] Norma ASTM D638-784

[23] Norma ASTM D3518

[24] Norma ASTM D2344

[25] Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, University of Houston. "FRP Systems in Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures", 2013.

[26] Department of Civil Engineering, School of Engineering, University of Minho, Azurem. "Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams", 2006.

[27] School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, China. "Fatigue behavior and life prediction of carbon fiber reinforced concrete under cyclic flexural loading", 2006.

[28] Zahra S. Tabatabaei, Jeffery S. Volz, Jason Baird, Benjamin P. Gliha, Darwin I. Keener. "Experimental and numerical analyses of long carbon fiber reinforced concrete panels exposed to blast loading".

[29] Planillas de cálculo provistas por Sika Argentina.

[30] Reglamento CIRSOC 201-2005.

[31] American Concrete Institute ACI - Committee 318 S-14. "Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural".

[32] what-when-how. "The Effect of Loading Rate on the Tensile Behavior of Single Fiber".

[33] Ricardo PROAÑO. "Comportamiento de vigas de concreto armado reforzadas con fibras de carbono"

[34] S. Echazú Lamas, A. Sanchez López, A. Pons, V. Rougier. "Vigas de hormigón armado reforzadas y /o reparadas con materiales compuestos".

[35] Sika at work. "Grafton Bridge strengthening, Auckland, NZ"

[36] Sika Colombia. "Las fisuras en el concreto reforzado".

[37] Sika Argentina. "Guía de soluciones: Reparación, refuerzo y protección de estructuras de hormigón".

[38] Sika at work. "Refuerzo estructural del Banco Multinacional en Tierra del Fuego, Argentina".

[39] Sika at work. "Refuerzo Estructural del Hotel Internacional 5 estrellas en Recoleta, Argentina".

[40] Sika at work. "Refuerzo estructural de Salón de ventas, Zona Norte, Argentina".

[41] Sika at work. "Refuerzo estructural en silos de hormigón ACA, Planta Huanguelem, Buenos Aires, Argentina".

[42] Sika at work. "Refuerzo estructural en Edificio de viviendas, Capital Federal, Argentina".

[43] UNE EN 1542-2000. "Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la adhesión por tracción directa".

[44] Paul H. Kohan, Rita F. Rango, Viviana C. Rougier. " Estudio Experimental de probetas de Hormigón Confinadas con Materiales Compuestos".