

CAPITULO 3

LOS MATERIALES COMPUESTOS Y SUS APLICACIONES EN EL REFUERZO A CORTANTE DE ESTRUCTURAS

En el presente, la industria de la construcción e ingeniería ha empezado a conocer las bondades y ventajas de nuevos materiales estructurales de naturaleza sintética, provenientes de procesos químicos sofisticados; hoy en día conocidos como materiales compuestos. Dichos materiales en un principio sólo eran usados como materiales arquitectónicos o decorativos, pasando después a tener aplicaciones estructurales en construcción, en aeronáutica y posteriormente aplicaciones de reparación tanto estructural como estético, llegando a ser conocidos estos materiales como compuestos estructurales.

Es cada vez más evidente la aplicación de materiales compuestos desde la última década, ya que tiempo atrás, su aplicación 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.

Para poder entender y predecir hasta cierto punto el comportamiento de los materiales compuestos es necesario conocerlos un poco más, tanto en las características de los materiales como en el comportamiento de éstos durante su proceso de aplicación, sin necesidad de entrar necesariamente en aspectos muy complejos de ingeniería química.

3.1 CONCEPTO DE MATERIALES COMPUESTOS

Un compuesto estructural es un sistema material consistente de dos o más fases en una escala macroscópica, cuyo comportamiento mecánico y propiedades están diseñados para ser superiores a aquellos materiales que lo constituyen cuando actúan independientemente. Una de las fases es usualmente discontinua, conocida

regularmente como fibra la cual es un material rígido y otra fase débil en continuo que es llamada matriz.

Las propiedades de un material compuesto dependen de las propiedades de los elementos, geometría, y distribución de las fases. Uno de los parámetros más importantes es la fracción en volumen o en peso de fibras en el material compuesto. La distribución del refuerzo determina la homogeneidad o uniformidad del sistema del material. Lo más no uniforme es la distribución del refuerzo, lo más heterogéneo causará una alta probabilidad de falla en las áreas débiles. La geometría y orientación del refuerzo afecta la anisotropía del sistema.

Las fases del sistema compuesto tienen diferentes funciones que dependen del tipo y aplicación del material compuesto. En el caso de un material compuesto de bajo o medio comportamiento, el refuerzo es usualmente en la forma de fibras cortas o partículas, proporcionando alguna rigidez, pero sólo frente a esfuerzos locales del material, ver la Fig. 3.1. La matriz en cierta forma es el principal elemento que soporta cargas gobernando las propiedades mecánicas del material. En el caso de compuestos estructurales de alto comportamiento, son usualmente reforzados con fibra continua, la cual es la columna vertebral del material que determina la rigidez y refuerzo en la dirección de la fibra y los esfuerzos locales se transfieren de una fibra a otra. La interfase a pesar de su corto tamaño, puede jugar un importante rol en controlar el mecanismo de fractura, la fuerza para fracturar y en conjunto el comportamiento, esfuerzo – deformación del material.

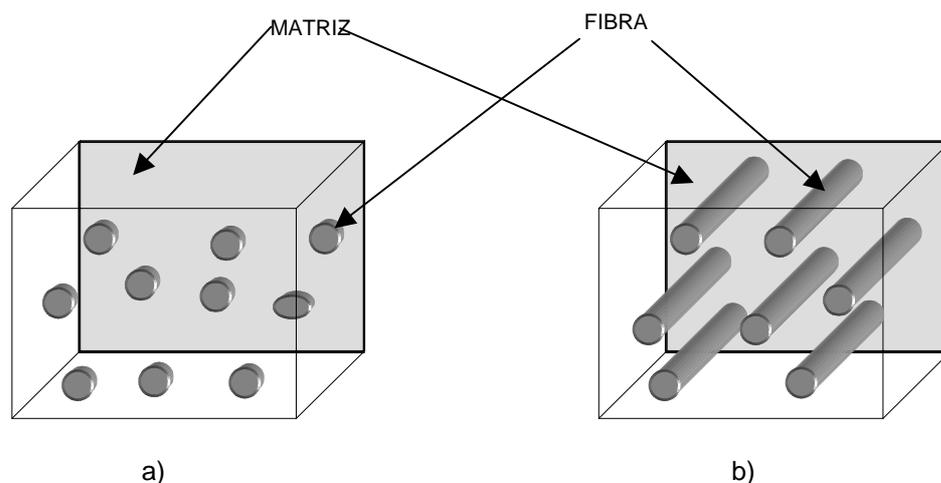


Fig. 3.1 Material compuesto
a) Compuestos reforzados con partículas
b) Compuestos reforzados con fibras

Una de las ventajas más importantes de los materiales compuestos es, que el alto coste de las materias primas se compensa con el bajo coste del equipamiento y mano de obra en el proceso de preparación, ensamblado, y aplicación de los materiales compuestos directamente en los elementos de hormigón que se pretenda reforzar o reparar según el caso.

Los materiales compuestos pueden operar en ambientes hostiles por grandes periodos de tiempo. Estos materiales tienen grandes periodos de vida bajo fatiga y su mantenimiento y reparación son muy fáciles. Sin embargo, presentan sensibilidad a ambientes higrotermales, donde existen cambios severos de humedad de la atmósfera, causando daños durante su vida de servicio, y pudiendo crecer los daños internos. Para poder detectar y pronosticar estos posibles daños, se requiere de sofisticadas técnicas no destructivas. Algunas veces es necesaria la aplicación de capas protectoras contra la erosión, el daño superficial y contacto con la luz, principalmente la luz solar, ya que la luz solar es portadora de los rayos ultravioleta, los cuales son causantes de que se rompan las cadenas moleculares de los polímeros. (*Recuero, 1997*)

3.2 DESCRIPCIÓN DE LAS FIBRAS

Este apartado sólo pretende dar una breve descripción de las fibras como material de refuerzo con la finalidad de valorar las bondades y limitaciones de las fibras en las que nos ocuparemos en este trabajo.

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

Fibras de Vidrio
Fibras Orgánicas (*Aramida*)
Fibras de Carbono

Existe otro tipo que son las fibras metálicas, aunque su aplicación esta más enfocada al refuerzo del hormigón formando parte del mismo en forma homogénea. Respecto a los otros tipos de fibras podemos comentar que el vidrio, es sin duda una de las fibras más extendida para el refuerzo plástico, siendo la de más bajo precio y, por otra parte, las fibras Orgánicas y de Carbono son fibras muy consistentes y de baja densidad, por lo que tiene múltiples aplicaciones, fundamentalmente hoy día, en el ámbito

aeroespacial y aplicaciones de ingeniería, a pesar de su elevado precio. Enseguida se da una descripción de los últimos tres tipos de fibra mencionadas.

3.2.1 Fibras de carbono

Las fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo tienen un diámetro de 7 a 8 μm y constan de pequeñas cristalitas de grafito “turbostrático” (una de las formas alotrópicas del carbono) En un monocristal de grafito los átomos de carbono se ordenan en redes hexagonales, como se muestra en la figura 3.2

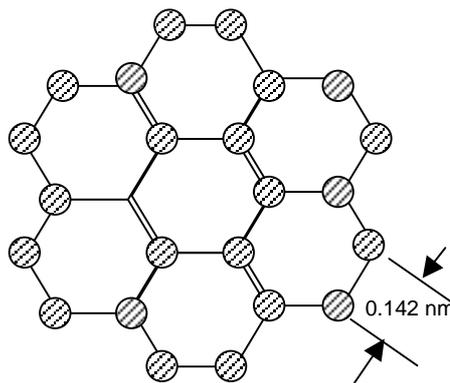


Fig. 3.2 Ordenamiento hexagonal de la red de átomos de Carbono.

EL módulo de elasticidad de las fibras de carbono depende del grado de perfección de la orientación, la cual varía considerablemente con las condiciones y proceso de fabricación. Las imperfecciones en orientación dan como resultado, huecos de forma compleja, alargados y paralelos al eje de la fibra. Estos actúan como puntos de concentración de tensiones y puntos débiles que llevan a la reducción de las propiedades. Otras causas de debilidad, que se asocian a menudo al proceso de fabricación, incluyen las picaduras y las macrocristalitas. (Ref. Derek Hull pag.9)

3.2.1.1 Procesos de obtención de fibras de carbono.

Las fibras tipo 1, obtenidas a partir de poliacrilonitrilo normal (base-PAN) tienen una delgada cobertura de capas circunferenciales y un núcleo con cristalitas desordenadas. A diferencia, algunas fibras obtenidas a partir de mesofases bituminosas muestran estructuras de capas orientadas radialmente. Estas distintas estructuras dan como resultado algunas diferencias significativas en las propiedades de las fibras.

Existen tres procedimientos principales para producir fibras con las capas gráficas orientadas preferencialmente paralelas al eje de la fibra como se describen enseguida:

- a) **Orientación del polímero precursor por estiramiento.** El PAN se emplea como material de origen, el cual es un polímero que se asemeja mucho al polietileno en su conformación molecular en la que cada grupo lateral alternado de hidrógeno del polietileno es reemplazado por un grupo nitrilo. En el primer estado del proceso la masa de PAN se convierte en una fibra que se estira entonces para producir la orientación de las cadenas a lo largo del eje de la fibra. Cuando se la calienta la fibra estirada, los grupos activos nitrilo interaccionan y producen un polímero en escalera que consta de una fila de anillos hexagonales. Mientras la fibra esta todavía bajo tensión se calienta en una atmósfera de oxígeno que conduce a la siguiente reacción química y a la formación de enlaces cruzados entre las moléculas de la escalera. El PAN oxigenado se reduce entonces para dar la estructura de anillo de carbono que se convierte en grafito turbostrático por calentamiento a temperaturas más altas. El modulo de elasticidad y la resistencia de las fibras dependerá de la temperatura del tratamiento de calentamiento final que determina el tamaño y la orientación de las cristalitas.
- b) **Orientación por hilado.** Este método consta del moldeo de hilos de alquitrán fundido para producir fibras. Durante este proceso de hilado los efectos hidrodinámicos en el orificio la orientación de las moléculas planas, pudiéndose inducir diferentes clases de orientación. EL hilo se hace infundible por oxidación a temperaturas por debajo de su punto de ablandamiento para evitar la fusión de los filamentos en un conjunto. Se carburiza entonces a temperaturas normalmente alrededor de los 2000°C. Se requerirán esfuerzos de tracción durante algunas de estas etapas para prevenir la relajación y pérdida de la orientación preferencial.
- c) **Orientación durante la grafitización.** A temperaturas muy altas las fibras carburizadas a partir de rayón, alquitrán o PAN pueden estirarse durante la etapa de grafitización. Esto tiene como consecuencia el deslizamiento de las capas de grafito unas sobre otras y la posterior orientación de las capas paralelamente al eje de la fibra.

Existen varias presentaciones de laminados de fibras de carbono, tales como fibras orientadas en forma unidireccional; fibras agrupadas en grupos de mechas, donde las mechas pueden orientarse en forma aleatoria (ver Fig.3.3) ó pueden ordenarse como un tejido (ver Fig. 3.4 y 3.5) (Hull, 1987)

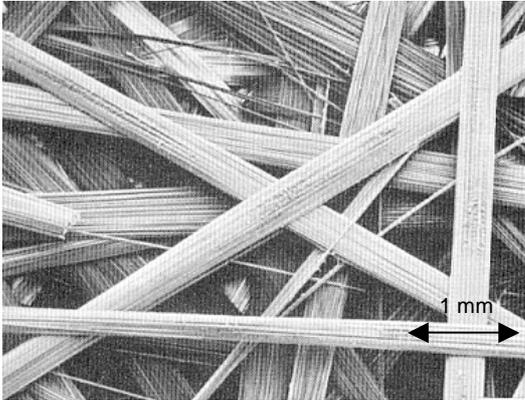


Fig. 3.3 Micrografía de barrido electrónico de un tejido de mechas antes de la infiltración con resina. (Hull, 1987)

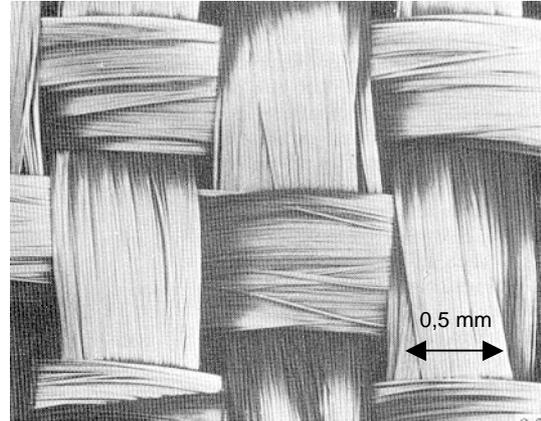


Fig. 3.4 Micrografía de barrido electrónico de un tejido de mechas antes de la impregnación con resinas. (Hull, 1987)

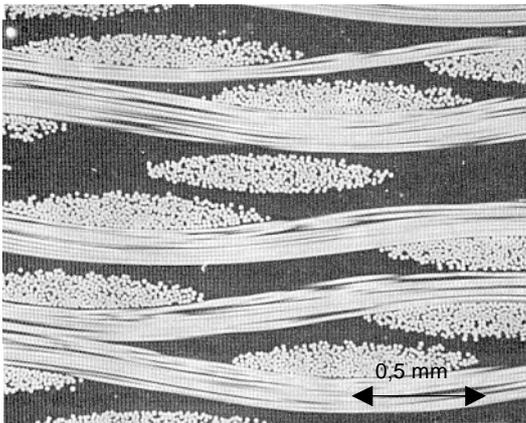


Fig. 3.5 Fotogrametría de una sección pulida de un laminado de tejido de mechas paralelas a un conjunto de fibras.

Los tipos de laminados más comúnmente usados como refuerzo en estructuras de hormigón, son los laminados con fibras unidireccionales y los laminados con mechas en tejido. (Hull, 1987)

Cuando se habla de un laminado, se está hablando de un conjunto de láminas que bien pueden ser láminas con fibras unidireccionales o láminas con fibras conformadas por tejidos de mechas como se muestra en la figura. 3.4. Las fibras unidireccionales se pueden encontrar en el mercado previamente embebidas en su resina en forma rígida. Los laminados de tejidos de fibra de carbono presentados en el mercado con el acrónimo TFC, se proporcionan en el mercado como un material flexible previo a su colocación y posteriormente embebido en su resina epóxica.

3.2.2 Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio se usan para reforzar matrices plásticas y así formar compuestos estructurados y productos moldeados. El vidrio es, con mucho, la fibra más utilizada, siendo además la de menor coste. Los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio tienen las siguientes características favorables: buena relación resistencia/peso; buena estabilidad dimensional; buena resistencia al calor, al frío, a la humedad y a la corrosión y buenas propiedades aislantes eléctricas. Las dos clases más importantes de vidrio utilizados para fabricar fibras para materiales compuestos son los vidrios E (eléctricos) y los vidrios S (de alta resistencia).

Los vidrios E son los más utilizados en la fabricación de fibras continuas. Básicamente, el vidrio E es un vidrio de borosilicato de calcio y aluminio con muy bajo o nulo contenido en potasio y sodio. EL vidrio E no modificado tiene una resistencia a la tracción de 3,44 GPa y un módulo de elasticidad de 72,3 GPa.

Los vidrios S tienen una relación resistencia/peso más alta y son más caros que los vidrios E. Estos vidrios se utilizan principalmente en aplicaciones militares y aeroespaciales. Su resistencia a la tracción está sobre los 4,48 GPa y poseen un módulo de elasticidad de unos 85,4 GPa. El diámetro de las fibras comerciales de vidrio E está entre 8 y 15 μm siendo con frecuencia de 11 μm .

La resistencia y el módulo elástico del vidrio están determinados en principio por la estructura tridimensional de los óxidos constituyentes. A diferencia de las fibras de carbono y Kevlar 49, las propiedades de las fibras de vidrio son isótropas, de forma que, por ejemplo, el módulo de Young a lo largo del eje de la fibra es el mismo que transversalmente al eje. Esto es consecuencia directa de la estructura tridimensional de la red del vidrio.

El factor más importante que determina la resistencia a la rotura del vidrio es el daño que las fibras experimentan cuando rozan entre sí durante las operaciones del proceso. El deterioro mecánico se produce en forma de pequeñas grietas superficiales. Los efectos de las grietas pueden minimizarse o eliminarse por un ataque corrosivo de la superficie, pero éste no es un procedimiento comercial.

(Smith, 1998)

3.2.3 Fibras Orgánicas

El concepto de fibras orgánicas está basado teóricamente en la creación de fibras con una alta resistencia y alto módulo de elasticidad a partir de una perfecta alineación de polímeros. Podemos tomar como ejemplo las largas cadenas de polietileno que constan de cadenas unidas directamente en zigzag de carbono a carbono completamente alineadas y agrupadas estrechamente, que tienen un módulo de elasticidad teórico de aproximadamente 220 GPa. Actualmente, se trata de fabricar fibras de polietileno de alta densidad y elevado módulo de elasticidad donde se busca la máxima linealidad y alargamiento entre las cadenas de los polímeros durante el proceso de fabricación, durante el hilado y estirado (Hull, 1987).

Las fibras orgánicas más comunes en el mercado son las fibras de **Aramida**, el cual es el nombre genérico de fibras de poliamida aromática. Las fibras de aramida fueron introducidas comercialmente en 1972 por Du Pont bajo el nombre comercial de Kevlar y en la actualidad hay dos tipos comerciales: Kevlar 29 y Kevlar 49. El Kevlar 29 tiene una densidad baja y alta resistencia aportada por las fibras de aramida, y está diseñado para aplicaciones como protección balística, cuerdas y cables. El Kevlar 49 está caracterizado por una baja densidad, alta resistencia y módulo elástico. Las propiedades del Kevlar 49 hacen a estas fibras útiles para el reforzado de plásticos en materiales compuestos para aplicaciones aeroespaciales, en marina, automoción y otras aplicaciones industriales.

La unidad química que se repite en la cadena del polímero Kevlar es la de la poliamida aromática que se muestra en la figura 3.6. En conjunto estas fibras tienen alta resistencia en la dirección de la fibra.

Por cuestiones prácticas a las fibras orgánicas Kevlar 49 fabricadas por Du Pont serán mencionadas con el nombre de fibras de *Aramida*.

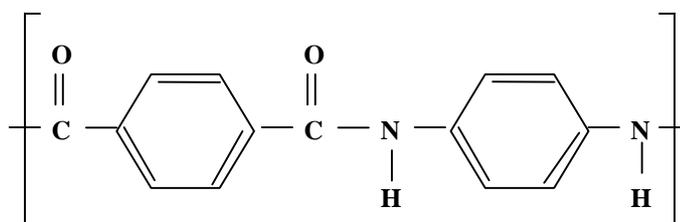


Figura 3.6 Unidad estructural repetitiva de las fibras de Aramida

3.3 COMPARACIÓN DE FIBRAS

En los siguientes párrafos se comparan brevemente ciertas propiedades entre los diversos tipos de fibras: Carbono, Vidrio y Aramida (*orgánica*)

3.3.1 Propiedades Específicas

Indudablemente, el factor más importante que ha conducido al rápido desarrollo de los materiales compuestos es la reducción de peso que puede conseguirse a partir del uso de fibras de baja densidad con 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. Las fibras de aramida tienen una resistencia a tracción específica un 40 – 50 % mayor que las fibras de vidrio y las fibras de carbono del tipo II. Esta última comparación no está plenamente justificada porque las fibras tienen que incorporarse a una resina para hacer un componente estructural. La fracción de volumen máxima de fibras normalmente alcanzada en el compuesto de la fibra orientada es aproximadamente 0,7, por lo que los valores deben reducirse por este factor.

3.3.2 Estabilidad Térmica

En ausencia de aire y de otras atmósferas oxidantes las fibras de carbono poseen unas propiedades excepcionalmente buenas a altas temperaturas. La resistencia y el módulo elástico dependen de la temperatura final del tratamiento térmico entre 1200°C y 2600°C. Las fibras de carbono mantienen sus propiedades a temperaturas por encima 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.

El vidrio en bruto tiene una temperatura de ablandamiento de aproximadamente 850°C pero la resistencia y el módulo de elasticidad de las fibras de vidrio disminuyen rápidamente por encima de los 250°C. Aunque la estabilidad térmica de la aramida es inferior a la de ambas fibras (la de vidrio y la de carbono), es adecuada probablemente para su uso en la mayoría de los sistemas con matriz de polímeros.

Además de la conservación de propiedades durante el uso en servicio a altas temperaturas es esencial que no se produzca deterioro de las propiedades durante las

operaciones de fabricación. Los cambios en las propiedades del vidrio parecen ser casi reversibles con la temperatura pero la Aramida puede sufrir un deterioro irreversible debido a cambios en la estructura interna.

Las fibras de Aramida experimentan una grave fotodegradación bajo la exposición a la luz solar. Ambas luces, la visible y la ultravioleta causan efectos, conduciendo a la descoloración y la reducción de las propiedades mecánicas. La degradación puede ser evitada cubriendo la superficie del material compuesto con una capa que absorba la luz.

3.3.3 Resistencia a Compresión

En la tabla 3.1 no se hace ninguna referencia a la resistencia y a la rigidez a compresión axial de las fibras. Estas propiedades son difíciles de medir y sólo pueden inferirse 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. Sin embargo, los datos de la tabla 3.2 indican que la resistencia a compresión longitudinal de láminas unidireccionales orientadas, fabricadas por Kevlar es sólo un 20% de su resistencia a tracción. En contraste, los correspondientes datos para las fibras de carbono y vidrio muestran que tienen resistencias parecidas en tracción y compresión.

TABLA 3.1 PROPIEDADES DE LAS FIBRAS DE CARBONO, VIDRIO Y KEVLAR A 20°C					
PROPIEDADES	UNIDADES	CARBONO BASE PAN TIPO I	CARBONO BASE PAN TIPO II	VIDRIO E	KEVLAR 49 POLIAMIDA AROMÁTICAS
Diámetro	µm	7,0 – 9,7	7,6 - 8,6	8,14	11,9
Densidad	10 ³ kgm ⁻³	1,95	1,75	2,56	1,45
Módulo de Young	GPa	390	250	76	125
Módulo (perpendicular al eje de la fibra)	GPa	12	20	76	
Resistencia a tracción	GPa	2,2	2,7	1,4 - 2,5 (típica) 3,5 (estirado recientemente)	2,8 – 3,6
Alargamiento en rotura	%	0,5	1,0	1,8 – 3,2	2,2 – 2,8

Datos proporcionados por el fabricante. Estos solo son una guía aproximada (Hull 1987)

La baja resistencia a compresión del Kevlar es debida a las propiedades anisótropas de la fibra y a la baja rigidez a cortadura. Básicamente, como en otras fibras textiles, el material tiene sólo una limitada elasticidad en compresión. A tracción, las cargas son

soportadas por los enlaces covalentes, pero a compresión los débiles enlaces de hidrógeno y las fuerzas de Van der Waal hacen que se produzca esta relajación local y deshilachamiento.

TABLA 3.2 VALORES TÍPICOS DE LAS PROPIEDADES DE RESISTENCIA DE LAS LÁMINAS UNIDIRECCIONALES					
Material	Tracción paralela MPa	Compresión paralela MPa	Tracción perpendicular MPa	Compresión perpendicular MPa	Cortante MPa
Poliéster – fibra de vidrio	650 – 750	600 – 900	20 – 25	90 – 120	45 – 69
Carbono tipo 1 - epoxi	850 – 1100	700 – 900	35 – 40	130 – 190	60 – 75
Kevlar 49 - epoxi	1100 – 1250	240 – 290	20 – 30	110 – 140	40 – 60

3.3.4 Flexibilidad y Rotura de las Fibras

Las curvas “tensión – deformación”, mostradas en la figura 3.7 sugiere que todas las fibras rompen de manera frágil a tracción sin ninguna deformación plástica o fluencia. Las láminas de fibras 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. (Hull, 1987)

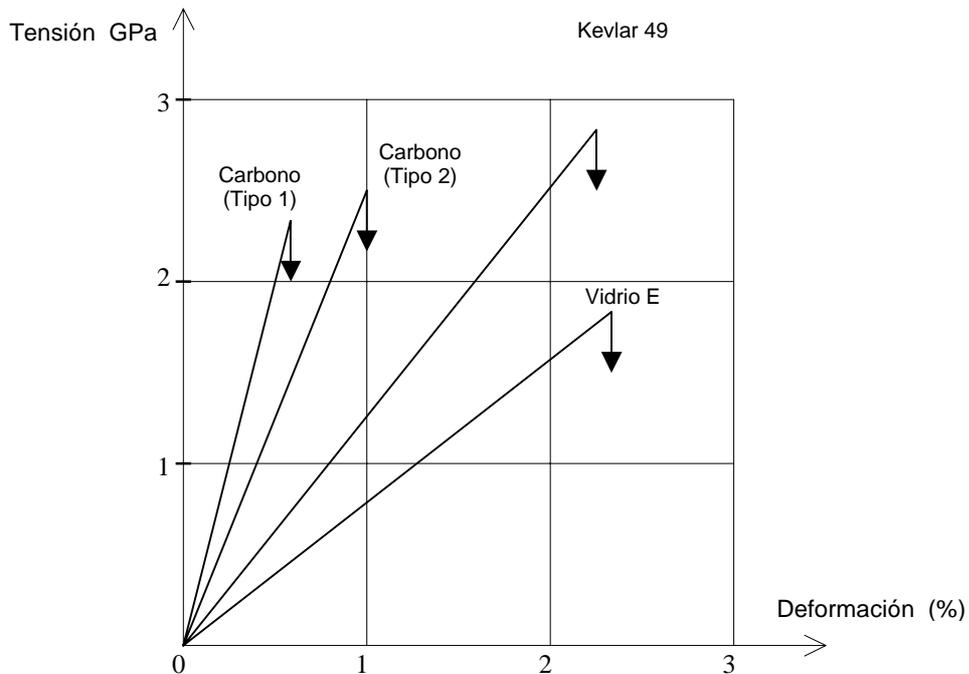


Figura 3.7 Curvas Tensión deformación de fibras. Las flechas verticales indican rotura completa.

3.4 DESCRIPCIÓN DE LAS RESINAS

3.4.1 Resinas Termoestables

En los polímeros termoestables, las resinas líquidas se convierten en sólidos duros y frágiles por uniones químicas cruzadas que llevan a la formación de una red tridimensional fuertemente unida de cadenas de polímeros. Las propiedades mecánicas dependen de las unidades moleculares que forman la red y de la extensión y densidad de los enlaces cruzados. Lo primero está determinado por los productos químicos iniciales usados y lo segundo por el control de los procesos de unión reticular que están involucrados en el curado. El curado puede conseguirse a la temperatura ambiente, pero es normal usar un sistema de curado que suponga el calentamiento a una o más temperaturas durante tiempos preestablecidos para alcanzar unas uniones cruzadas óptimas y por tanto unas mejores propiedades. A menudo se da un tratamiento de postcurado a una temperatura final relativamente alta para minimizar cualquier posterior curado y cambio de propiedades en servicio. La contracción durante el curado y la contracción térmica por enfriamiento posterior al curado pueden provocar tensiones internas en los materiales compuestos

3.4.2 Termoplásticos

Al contrario que las resinas termoestables, los termoplásticos no tienen enlaces cruzados. Obtienen su resistencia y rigidez de las propiedades inherentes a las unidades monoméricas y de su peso molecular muy elevado. Esto asegura que en los termoplásticos amorfos haya una alta concentración de entramados moleculares que actúan como enlaces cruzados y que en los materiales cristalinos haya un alto grado de orientación y ordenación molecular. En los materiales amorfos, el calentamiento conduce al desentramado y al cambio de sólido rígido a líquido viscoso. En los materiales cristalinos el calentamiento da como resultado la fusión de la fase cristalina para dar un líquido amorfo y viscoso.

3.5 CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES COMPUESTOS

3.5.1 Esfuerzos Térmicos

Los esfuerzos de contracción durante el curado y los esfuerzos térmicos debidos a las diferencias entre los coeficientes de dilatación térmica de la matriz y la fibra pueden tener un efecto principal sobre los microesfuerzos internos en un material compuesto, sumándose a los esfuerzos producidos por las cargas externas. Los microesfuerzos

son a menudo suficientes para producir microgrietas incluso en ausencia de cargas externas.

Los esfuerzos debidos al curado surgen de la combinación de contracción de la resina durante procesos de curado y la contracción térmica diferencial después de un postcurado a una alta temperatura. La mayor parte de las contracciones de la resina se producen cuando está todavía líquida, de forma que no se desarrollan estas tensiones. Esta contracción puede ocasionar rechupes y otros efectos superficiales no deseados en los productos plásticos. Por esta razón se ha prestado atención al desarrollo de sistemas de resina que tengan unas características de contracción bajas. La contracción de la resina en las últimas etapas del curado ocasiona microtensiones que no pueden ser eliminadas.

3.5.2 Propiedades Elásticas de las Láminas Unidireccionales

Una buena adherencia en la zona de interfase fibra – matriz se obtiene a través de una buena transmisión de esfuerzos de la matriz a la fibra. Para poder plantear de manera teórica los esfuerzos que se transmiten, es necesario apoyarse en las siguientes hipótesis:

- i) La matriz y la fibra se comportan como materiales elásticos.
- ii) La interfase es infinitamente delgada.
- iii) La unión entre la fibra y la matriz es perfecta, lo cual implica que no hay discontinuidad en la deformación a través de la interfase.
- iv) El material cercano a la fibra tiene las mismas propiedades que el material en forma bruta.
- v) Las fibras están ordenadas en una disposición repetitiva o regular.

Las anteriores hipótesis son necesarias para obtener soluciones de los modelos matemáticos, siendo los resultados obtenidos de los modelos matemáticos una importante guía para determinar lo que pasa probablemente en un sistema compuesto real. Sin embargo ninguna de las suposiciones (ii) a (iv) es estrictamente correcta porque la interfase real tiene una estructura física y química complicada. Las hipótesis (i) y (v) requieren ser verificadas según los materiales que componen el compuesto. Sin embargo, teóricamente nos apoyaremos en las hipótesis anteriores sobre las propiedades de interfase para poder calcular la distribución de esfuerzos y deformaciones en un material compuesto en función de la forma, la distribución y

fracción de volumen de las fibras y las propiedades elásticas de las fibras y de la matriz y, a partir de la distribución de los esfuerzos y deformaciones, pueden calcularse las propiedades elásticas del material compuesto.

Cuando se aplica una carga a tracción o compresión paralela a las fibras de una lámina unidireccional (ver Fig. 3.8) la deformación ε_1 en la matriz será la misma que la deformación en la fibra si la unión entre la fibra y la matriz es perfecta. Si ambas, la fibra y la matriz, se comportan elásticamente los esfuerzos correspondientes vienen dados entonces, aproximadamente, por:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1, \quad \sigma_m = E_m \varepsilon_1 \quad (3.1)$$

Se sigue que si $E_f > E_m$, la tensión en las fibras es mayor que en la matriz. Esto es, por supuesto, la base subyacente del refuerzo con fibras, puesto que las fibras soportan la parte principal de la carga aplicada P . Para un material compuesto con una sección recta de superficie total A , el refuerzo medio viene dado por:

$$P = \sigma_1 A \quad (3.2)$$

Puesto que $P = P_f + P_m$ (3.3)

Y $P_f = \sigma_f A_f, \quad P_m = \sigma_m A_m$ (3.4)

Resulta $P = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$ (3.5)

Donde A_f y A_m son las áreas de las secciones de la fibra y la matriz respectivamente y P_f y P_m las cargas correspondientes. Sustituyendo por las ecuaciones (3.1) y la relación

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \quad (3.6)$$

en estas ecuaciones da:

$$E_1 = E_f A_f/A + E_m A_m/A \quad (3.7)$$

Ahora bien $V_f = A_f/A$ y $V_m = A_m/A$ (3.8)

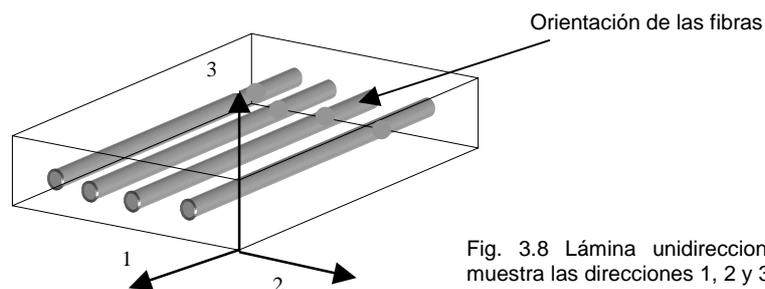


Fig. 3.8 Lámina unidireccional que muestra las direcciones 1, 2 y 3

$$\begin{aligned} \text{Por tanto,} & \quad E_1 = E_f V_f + E_m V_m & (3.9) \\ \text{Y puesto que} & \quad V_m = 1 - V_f \\ \text{O bien} & \quad E = E_f V_f + E_m(1 - V_f) \end{aligned}$$

A esto se hace referencia con frecuencia como ecuación de la “*regla de mezclas*”.

(Smith, 1998)

3.5.3 Resistencia de las Láminas Unidireccionales

Existen muy pocas aplicaciones prácticas, si es que hay alguna, de materiales compuestos basados completamente en láminas unidireccionales. Esto se debe principalmente a que las rigideces y en particular las resistencias transversales a cortadura y a tracción son mucho menores que las correspondientes rigideces y resistencias paralelamente a las fibras. Las primeras propiedades están dominadas por las propiedades de la matriz mientras que las últimas lo están por las propiedades de la fibra.

Una lámina puede fallar de varios modos diferentes dependientes de las condiciones de carga exteriores. Para la finalidad de diseño probablemente es suficiente con conocer las tensiones de rotura para diferentes sistemas de resina – fibra y para un intervalo de fracciones de volumen de fibra.

Para el cálculo de la resistencia de las láminas en función de la resistencia de las fibras y de la matriz es esencial la comprensión de los mecanismos de rotura mostrados en la tabla 3.2 con los valores comunes de las propiedades mecánicas de las láminas unidireccionales.

3.6 APLICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS COMO ELEMENTOS DE REHABILITACIÓN Y REFUERZO ESTRUCTURAL

3.6.1 Refuerzo Estructural

El hormigón es un material complejo que reproduce, en cierta forma, la alta resistencia a la compresión que presentan las piedras naturales, pero con la ventaja adicional de poder adoptar cualquier forma según se requiera. Esta mezcla, en estado fluido, es moldeada según se requiera; luego el agua y el cemento reaccionan químicamente para formar un material aglomerado de elevada resistencia a la compresión.

Sin embargo, frente a esfuerzos a tracción, el hormigón no puede oponer mayor resistencia que la unión superficial entre el cemento aglomerante y las piedras molidas que lo forman. Así, la resistencia del hormigón a estos esfuerzos de tracción es mucho menor que los esfuerzos de compresión.

Como la mayoría de las estructuras que se utilizan en construcción civil requieren resistencia pareja a ambos tipos de carga, la solución consiste en transferir los esfuerzos de tracción a otros materiales más resistentes, tales como el acero o más actualmente, a otros materiales de refuerzo, como son los materiales plásticos reforzados con fibras (FRP) ó materiales compuestos, sustituyendo el acero de refuerzo en flexión y en cortante en los hormigones armados y pretensados.

Los materiales compuestos de alto comportamiento, tales como los materiales poliméricos reforzados con fibras, no han alcanzado todavía su madurez en el empleo para estructuras de ingeniería civil. No existen todavía procedimientos fiables de análisis de predicción de falla y los procedimientos para estructuras de viga compuesta, placa y láminas se han desarrollado en gran parte a partir de métodos isotrópicos, sin tener en cuenta el cortante interláminar o haciendo suposiciones muy simplificadas.

La restauración, refuerzo o rehabilitación de estructuras resulta ser uno de los campos de aplicación de mayor interés y más directamente relacionado con los nuevos materiales compuestos. La industria de la construcción no ha aceptado aún el uso estructural extenso de los nuevos materiales compuestos, porque todavía no conoce bien cuándo existen ventajas respecto a los materiales tradicionales.

Los profesionales implicados en el proyecto y en la ejecución de obras suelen ser conservadores y resistirse a los cambios. Para aceptar un nuevo material requieren disponer de normativa relativa a la nueva tecnología, lo que hace necesario que alguna entidad lidere la aceptación del nuevo material o tecnología. Actualmente no existe, en el entorno nacional ni internacional, la experiencia adecuada para el desarrollo de tal normativa. Para ello es necesario tener la adecuada base experimental y de realizaciones con éxito.

El objetivo fundamental es fomentar la aplicación de estos nuevos compuestos en el refuerzo de estructuras de edificación y obra civil, atendiendo a su patología, calidad y durabilidad del refuerzo.

Debe resaltarse la importancia cada vez mayor que tiene el mantenimiento de las obras de infraestructura. En muchos casos, el coste es secundario frente a la calidad, estética y durabilidad del resultado. En todas las ocasiones es importante reducir las molestias de obras en edificios, carreteras o vías de comunicación en general, que se encuentran en funcionamiento. La restauración, refuerzo o rehabilitación de estructuras resulta ser uno de los aspectos de mayor interés y más directamente relacionados con los nuevos materiales compuestos. La resistencia, ligereza y el comportamiento ante los agentes climáticos y la corrosión hacen de estos unos serios candidatos para su utilización en este tipo de proyectos. Canadá, Japón y EE.UU. son los países en los que más se ha avanzado en este campo.

En Europa, países como Suiza, Alemania e Italia han hecho numerosas realizaciones de refuerzos de estructuras, principalmente puentes y edificios históricos.

Entre las varias formas de aplicación de estos nuevos materiales compuestos en el refuerzo o rehabilitación de estructuras pueden citarse:

- Sustitución del armado corroído y el hormigón que le rodea. Las reparaciones consisten en sustituir las armaduras corroídas y el hormigón que lo rodea por una nueva capa de hormigón a la que se le une una lámina de materiales compuestos de matriz termoestable.

- Suplemento a la armadura existente, con objeto de mejorar la capacidad a flexión, cortante, o la ductilidad del elemento reforzado. Pueden utilizarse láminas de poliéster reforzado con fibras de vidrio/poliéster o de la resina epóxica reforzada con fibras de aramida o carbono. Estas últimas más rígidas y resistentes que las fibras de vidrio, aunque su coste es mayor que el del acero, son más manejables, por lo que el coste de su puesta en obra es menor.
- Colocación de perfiles de fibra de vidrio. Los perfiles pultrusionados están especialmente indicados para restauración, ya que al estar todas las fibras en la dirección del perfil, la resistencia y rigidez son muy elevadas.
- Pretensado exterior de la estructura. Pueden utilizarse cables o barras de materiales compuestos, o elementos especialmente diseñados preparados para su pretensado con sistemas habituales.
- Utilización de enrejillados formando superficies tridimensionales formadas por "costillas" lineales de poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Un tipo de refuerzo habitual es el de flexión, pegando bandas preimpregnadas o rígidas en las zonas de tracción. El 5% de los puentes deteriorados en Europa pueden ser reforzados de esta forma empleando los nuevos materiales compuestos, en lugar de las convencionales láminas de acero (*Recuero, 1997*) En España ya se han realizado algunos refuerzos de este tipo. Estos materiales, en un ambiente agresivo muestran una buena conducta a lo largo del tiempo, mientras que el acero acaba por corroerse. Otra desventaja que presentan las láminas de acero es su limitada longitud (raramente se sobrepasan los 6 - 8 m), mientras que con estos materiales se puede conseguir grandes longitudes.

Otro tipo de refuerzo utilizado es el zunchado de pilas, envolviéndoles en bandas de fibras preimpregnadas. En 1981 se modificó la normativa USA respecto al proyecto antisísmico de los puentes, multiplicando por 8 la armadura transversal necesaria en las pilas. Por este motivo, se ha utilizado este tipo de refuerzo en parte de los puentes de California, con objeto de mejorar la ductilidad de las pilas ante acciones sísmicas. Una vez curado, el material se pintaba por estética y para proteger la matriz de la acción de los rayos UV.

Un campo claro de utilización es el de estructuras en ambientes marinos o sumergidas. La armada USA ha utilizado este tipo de refuerzo en muelles de atraque, debido al uso de grúas móviles de gran capacidad y al aumento del tamaño de los barcos. Están realizando estudios experimentales al respecto en sus instalaciones de San Diego. También se han utilizado bandas rígidas de CFRP en el refuerzo de estructuras antiguas de ladrillo sometidas a distintos tipos de esfuerzos.

Otro campo de interés es el de cables u otros elementos pretensados. De hecho, se está estudiando la forma de pretensar bandas rígidas de CFRP, con objeto de mejorar el aprovechamiento de su capacidad resistente. Los cables para pretensar se vienen usando hace algunos años. Su comportamiento a corto plazo es satisfactorio, aunque el comportamiento a largo plazo está aún en experimentación. Éstos se usan principalmente en Japón y en Europa, aunque sólo pequeñas compañías poseen cables apropiados, donde los sistemas de anclaje pueden cumplir con los requerimientos estáticos. Se puede identificar dos tipos de anclajes, el primero en los que la carga es introducida por fuerzas entre la matriz y el tendón compuesto y el segundo tipo es similar al de tendones de acero convencional, donde la fuerza es introducida por fricción. Hay algún otro sistema que combina el caso de anclajes mecánicos y adhesivos.

3.6.2 Unión del refuerzo a la estructura

La unión del refuerzo de FRP a la estructura, al igual que con otros tipos de refuerzo, puede hacerse mediante pegado, que es el caso más habitual, o mediante conexiones mecánicas. Estas últimas pueden darse en elementos especiales en los que se refuerza adecuadamente las zonas en que se va a realizar la conexión mecánica (tornillos, pasadores, anclajes, etc.) para que resistan las tensiones producidas.

TABLA 3.3 SISTEMAS ESTRUCTURALES		
VENTAJAS Y DESVENTAJA DE DIVERSOS SISTEMAS DE ADHERENCIA		
SISTEMAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
EPOXI	Alta adhesión final. Durabilidad. Cualquier espesor. Contracción del 2%.	Preparación de superficies. Vida de la mezcla. Ciclos de curado. Dosificación y mezcla de los componentes
POLIETURANOS	Flexibilidad. Mejor para plásticos.	Menor adhesión final que los epoxi, Peor para cristal y metales.
ACRÍLICOS	Buena adhesión final. Fácil aplicación. Curado rápido. Preparación de superficie	Espesor de la capa. Contracción del 7%. Durabilidad.

En el caso de fibras o telas preimpregnadas, el propio monómero de impregnación actúa como pegamento, en tanto que en las láminas prefabricadas el método habitual de unión con las estructuras existentes es mediante pegado. En consecuencia, uno de los aspectos importantes en el uso de estos materiales compuestos es la selección del adhesivo adecuado. Dado que los materiales para la construcción son de naturaleza muy variada y abarcan hormigón, piedra, metales, madera, plásticos, vidrio, etc., existen una diversidad de adhesivos orientados a unirlos del modo más apropiado técnica y económicamente.

Se entiende como adhesivo estructural aquél que, usado en combinación con un material estructural, trabaja de modo que la junta o la línea de encolado no falle cuando el material trabaja a tensión de hasta su límite elástico y permita que la estructura trabaje según requerimientos mecánicos y físicos. Atendiendo a un criterio resistente puramente numérico, resulta difícil encontrar la frontera entre adhesivo estructural y no estructural, pudiendo definirse como estructural aquél que supere, a temperatura ambiente, los 10 MPa de resistencia a tracción.

3.6.3 Consideraciones para el refuerzo

Las FRP presentan un comportamiento elástico y lineal hasta rotura, lo que les confiere un comportamiento frágil. Esta falta de aviso previo a la rotura se refleja en los coeficientes de seguridad a adoptar y en los requerimientos de capacidad residual de la estructura a reforzar. Las reglas de cálculo dependerán de las características de las FRP y el medio en que estará, como es: su rigidez, deformabilidad, forma de unión, las características del ambiente en que va a estar, etc. En general, los fabricantes de los productos proponen criterios de cálculo. Debe señalarse que los borradores de normas para estructuras de materiales compuestos de Japón y de Canadá no incluyen el refuerzo de estructuras, sino sólo estructuras originales, lo cual motiva aun más al estudio de esta área.

Se ha podido comprobar experimentalmente que el cálculo a flexión de vigas o placas reforzadas con bandas puede hacerse siguiendo las reglas aplicables al hormigón armado (*MbraceTM*, 1998). Así, se supone que la deformación de la sección plana es también plana, pese a que no es cierto para la capa de adhesivo. Las deformaciones límites de las bandas se deben elegir de modo que se evite la separación prematura

de la banda, del hormigón. También son aplicables las reglas de cálculo del hormigón respecto al cortante. Adicionalmente, hay que comprobar otras posibles roturas de la banda del adhesivo, despegue o la delaminación de las bandas (láminas) (*MbraceTM*, 1998).

Otro aspecto a contemplar es la influencia de las variaciones térmicas y de las temperaturas alcanzadas. Ya se ha mencionado la diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica entre el hormigón y las FRP, y además los polímeros pueden cambiar sus características, a veces de forma irreversible, al pasar de ciertas temperaturas. Esto puede llevar a la necesidad de pinturas o de otros recubrimientos en casos de intemperie. Piénsese que una banda con fibra de carbono es casi un cuerpo negro y que expuesta al sol puede adquirir temperaturas muy elevadas. Estas consideraciones se refieren tanto a la FRP como al adhesivo.

Existen algunos criterios de selección mínimos de los materiales compuestos de acuerdo a las necesidades estructurales que se requieran, entre éstos tenemos:

- La resistencia a tracción, ya que el Compuesto estará sometido a tracción, como esfuerzo principal.
- La resistencia a compresión, ya que debido a las cargas variables, puede haber momentos o situaciones en las que esté funcionando a compresión.
- El módulo de elasticidad, con objeto de que absorba la mayor cantidad de tensión, descargando al acero de refuerzo.
- El funcionamiento a largo plazo, con objeto de maximizar la vida útil del elemento estructural.
- El comportamiento a fatiga, ya que sufrirá ciclos alternados de carga - descarga.
- La densidad, con objeto de no sobrecargar la estructura.
- La resistencia alcalina, ya que estarán en contacto con el hormigón.
- El precio, con el objeto de no encarecer el coste de refuerzo.

3.7 REFUERZO Y REPARACIÓN A CORTANTE EN HORMIGÓN ARMADO

3.7.1 Aplicación mediante láminas de CFRP

La aplicación cada vez más creciente de los materiales compuestos en la reparación de elementos estructurales, ha implicado que diferentes grupos de investigadores en todo el mundo estén interesados en desarrollar técnicas avanzadas para la aplicación óptima de las fibras de carbono en la reparación sobre hormigón armado. (Al-Sulaimani, 1994)

Investigaciones recientes han aportado resultados referentes al comportamiento entre la superficie del hormigón, el material adhesivo y las fibras de material compuesto CFRP de reparación. (Khalifa; Gold; Nanni; Aziz, 1998)

Se han realizado pruebas sobre vigas de hormigón pretensadas, aplicando refuerzos a cortante. En las dos referencias anteriores se ha trabajado con el siguiente modelo:

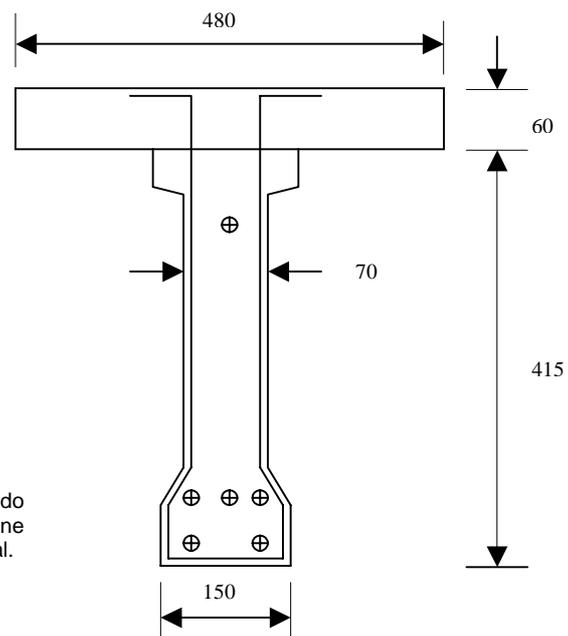
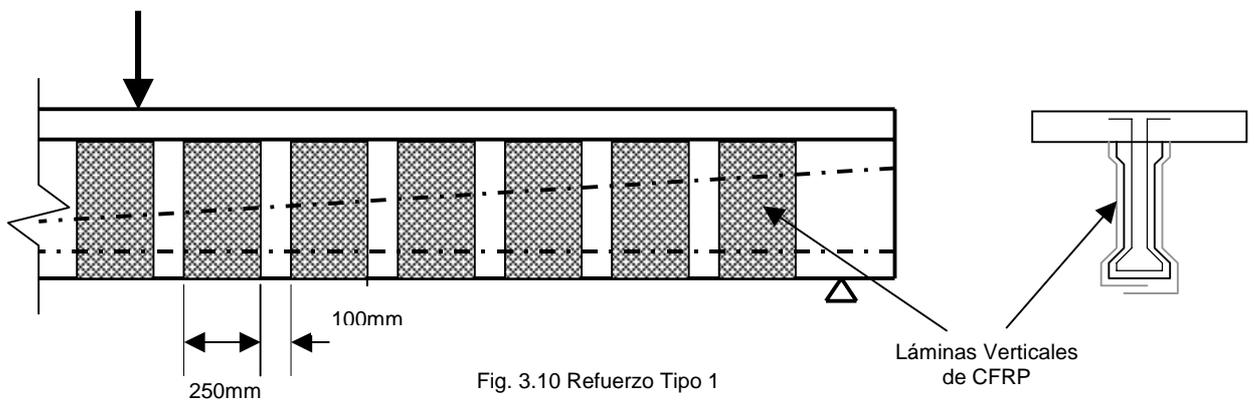


Fig 3.9 El modelo que muestra este esquema, esta basado en el puente Maryland, Canadá, donde dicho modelo tiene una longitud de 10m y esta a una escala 1:3.5 del original.

De acuerdo al anterior modelo se tomó un espécimen para ser ensayado y tener sus resultados de resistencia y carga como parámetros de control. Los distintos tipos de refuerzo sobre las vigas pretensadas se describen a continuación:

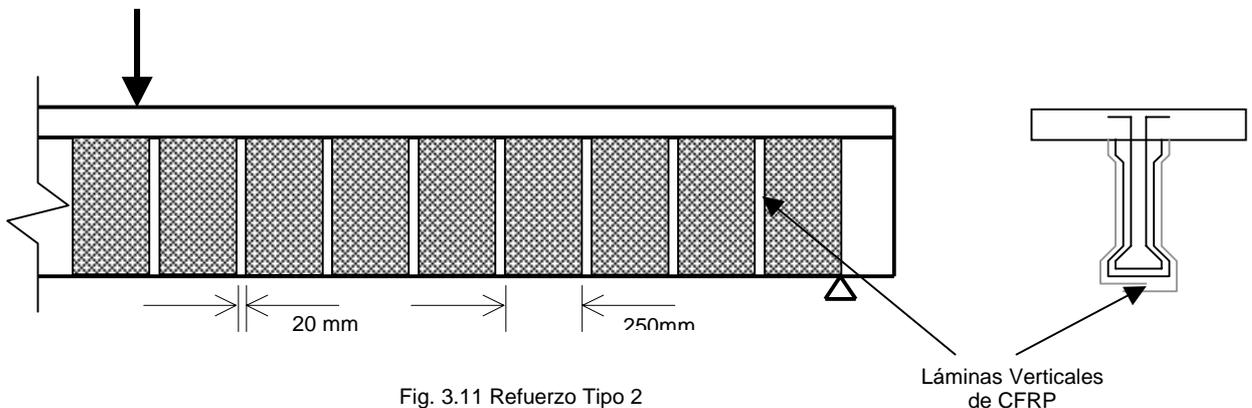
Refuerzo Tipo 1

La viga es preparada abujardando la superficie de hormigón donde se aplicará la resina epoxi, posteriormente se limpia con aire a presión eliminando el polvo. Posteriormente la viga es reforzada con fibras CFRP en forma de láminas. Las fibras son aplicadas en capas de 250mm de ancho y separadas 100mm una capa con respecto a la otra. Las láminas de CFRP son colocadas con la orientación de la fibra en forma vertical a ambos lados de la sección transversal de la viga como se muestra en la Fig. 3.10



Refuerzo tipo 2

La viga es reforzada con CFRP en forma de láminas o bandas. Las bandas de 250mm de ancho son colocadas en forma vertical, separadas 20mm una con respecto a la otra. La superficie de contacto es preparada, limpiando con chorro de agua a presión sobre la superficie de hormigón como se muestra en la fig. 3.11



Refuerzo Tipo 3

La viga es reforzada con CFRP en forma de láminas. Las fibras de CFRP son colocadas como bandas (o láminas) de 250mm de ancho, orientadas las fibras en forma diagonal, formando un ángulo de 45° con la vertical, y están, separadas 100mm una con respecto a la otra. La superficie de contacto es preparada, limpiándose con chorro de agua a presión dejando la superficie libre de polvo como muestra la fig. 3.12

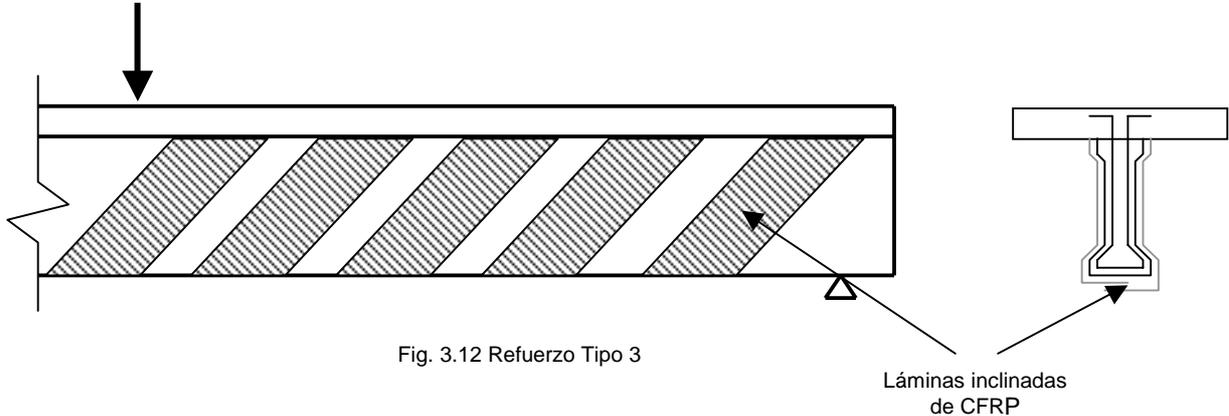


Fig. 3.12 Refuerzo Tipo 3

Refuerzo Tipo 4

La viga es reforzada con CFRP en forma de láminas. Las fibras de CFRP son colocadas como bandas (o láminas) de 250mm de ancho, orientadas las fibras en forma diagonal, formando un ángulo de 45° con la vertical, y están, separadas 20mm una con respecto a la otra. La superficie de contacto es preparada, limpiándose con chorro de agua a presión dejando la superficie libre de polvo como muestra la fig. 3.13

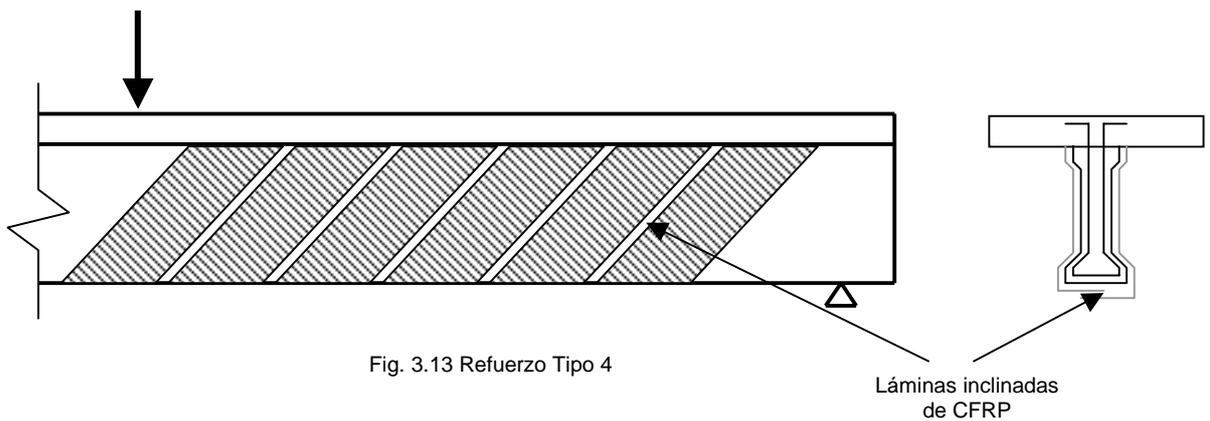
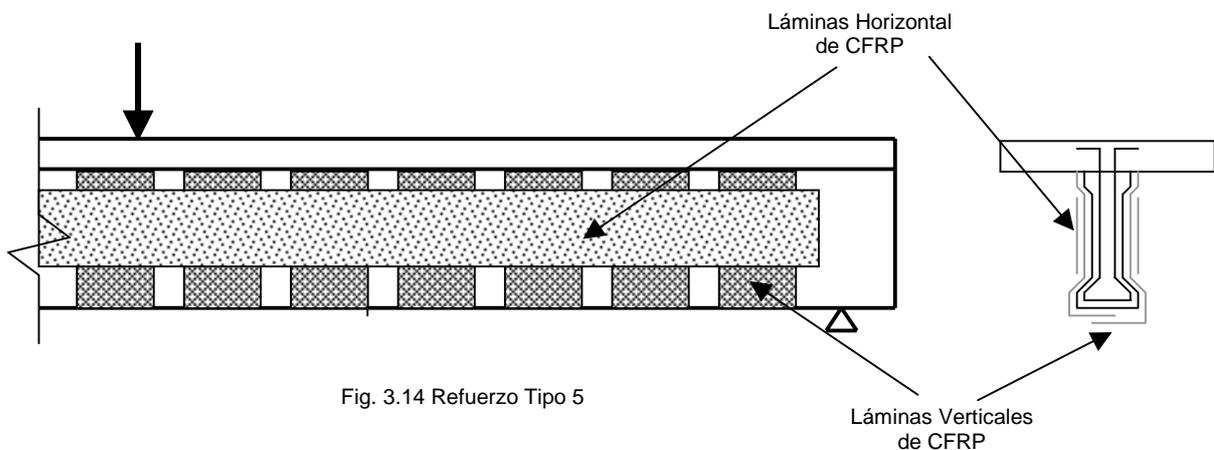


Fig. 3.13 Refuerzo Tipo 4

Refuerzo Tipo 5

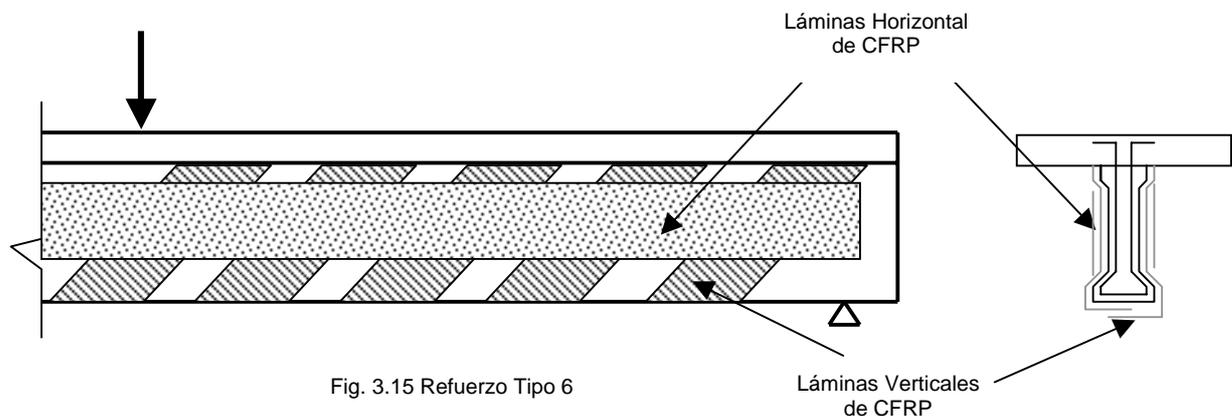
La viga es reforzada con CFRP en forma de láminas. La superficie de contacto es preparada, limpiándose con aire a presión dejando la superficie libre de polvo. Las fibras aplicadas como bandas de refuerzo de 250mm de ancho, colocadas con una separación de 100mm una con respecto a la otra. Las láminas de CFRP son colocadas con orientación vertical a ambos lados de la sección transversal de la viga.

Sobre las bandas verticales se coloca una banda de CFRP a todo lo largo de la viga, con el sentido de las fibras en forma horizontal como muestra la Fig. 3.14.



Refuerzo Tipo 6

La viga es reforzada con CFRP en forma de láminas. La superficie es limpiada con chorro de agua a presión. Las fibras son colocadas como bandas de 250mm de ancho, en posición diagonal, separadas 100mm una con respecto a la otra. Sobre las bandas en diagonal, se coloca una banda de CFRP a todo lo largo de la viga, con el sentido de las fibras en forma horizontal como muestra la fig. 3.15.



En las pruebas realizadas sobre las vigas se aplicaron las fibras CFRP de tres suministradores. (Tonen, Mitsubishi, Hexcel Fyfe)

TABLA 3.4 CARACTERÍSTICAS DE LAS VIGAS								
Viga	Disposición del refuerzo	Distancia entre láminas	Espesor y tipo de la CFRP (mm)	Preparación de superficie	Fc' (MPa)	Vc (kN)	Vu (kN)	(Vu) (Vu)control
VA	Viga de control	/	/	/	46	66	137	1.00
VB	Estribos prensados	/	/	/	46	66	174	1.27
VR1	CFRP vertical	100	0.11 T*	Picado	53	74	151	1.10
VR2	CFRP vertical	20	0.11 M*	Agua-presión	44	76	161	1.17
VR3	CFRP diagonal	100	0.79 H*	Agua-presión	55	72	177	1.29
VR4	CFRP diagonal	20	0.11 M*	Agua presión	44	76	173	1.26
VR5	CFRP horiz. y vert.	100	0.11 T*	Picado	53	74	185	1.34
VR6	CFRP horiz y diag.	100	0.79 H*	Agua-presión	55	72	186	1.36

Características proporcionadas por T* - Tonen, M* - Mitsubishi, H* - Hexcel Fyfe

La tabla 3.4 muestra una comparación de la carga última de falla a cortante, Vu, para todas las pruebas. La carga de fisuración a cortante fue típicamente determinada por la correspondiente carga al iniciar las primeras grietas inclinadas. Las fibras adheridas impiden ver claramente la formación de las fisuras. La resistencia a cortante nominal dada por el hormigón (Vc) fue determinada mediante la resistencia media de los estribos y el hormigón usando bandas extensométricas lineales y rosetas, respectivamente.

La última columna nos indica los incrementos de carga a cortante en porcentaje que presentaron las vigas reforzadas con CFRP.

Los resultados nos muestran que colocar el sentido del tejido de las fibras en forma perpendicular a las fisuras incrementa la resistencia a cortante aproximadamente en 10% más que con las fibras alineadas verticalmente a ambos lados de la sección transversal de la viga.

Preparar la superficie del hormigón usando chorro de agua a presión ayuda a dar una mejor adherencia para unir el hormigón y las CFRP mediante la resina epóxica. (Hutchinson, 1997)

El gráfico siguiente corresponde al comportamiento de la aplicación del cortante con respecto a la deformación de los estribos, comparando la viga de referencia sin CFRP con las vigas con refuerzo adherido tanto vertical, horizontal como diagonal. En

general en esta campaña experimental se observa que el refuerzo en diagonal tuvo un mejor comportamiento.

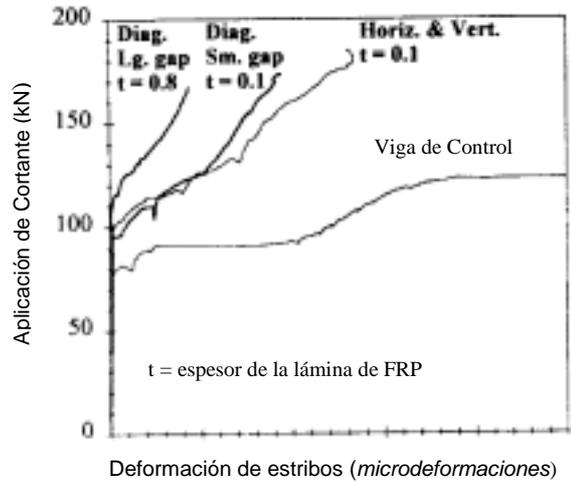


Fig. 3.16 Cortante VS Deformación de Estribos (Hutchinson 1997).

Otras investigaciones y pruebas experimentales realizadas en vigas de hormigón armado presentan los diversos mecanismos de falla de acuerdo a diferentes formas de refuerzo a cortante con láminas y tejidos de fibras de vidrio, carbono y aramida, tal como se muestra en la figura 3.17. (Triantafillou, 1998) (Chaallal; Nollet; Perraton, 1998)

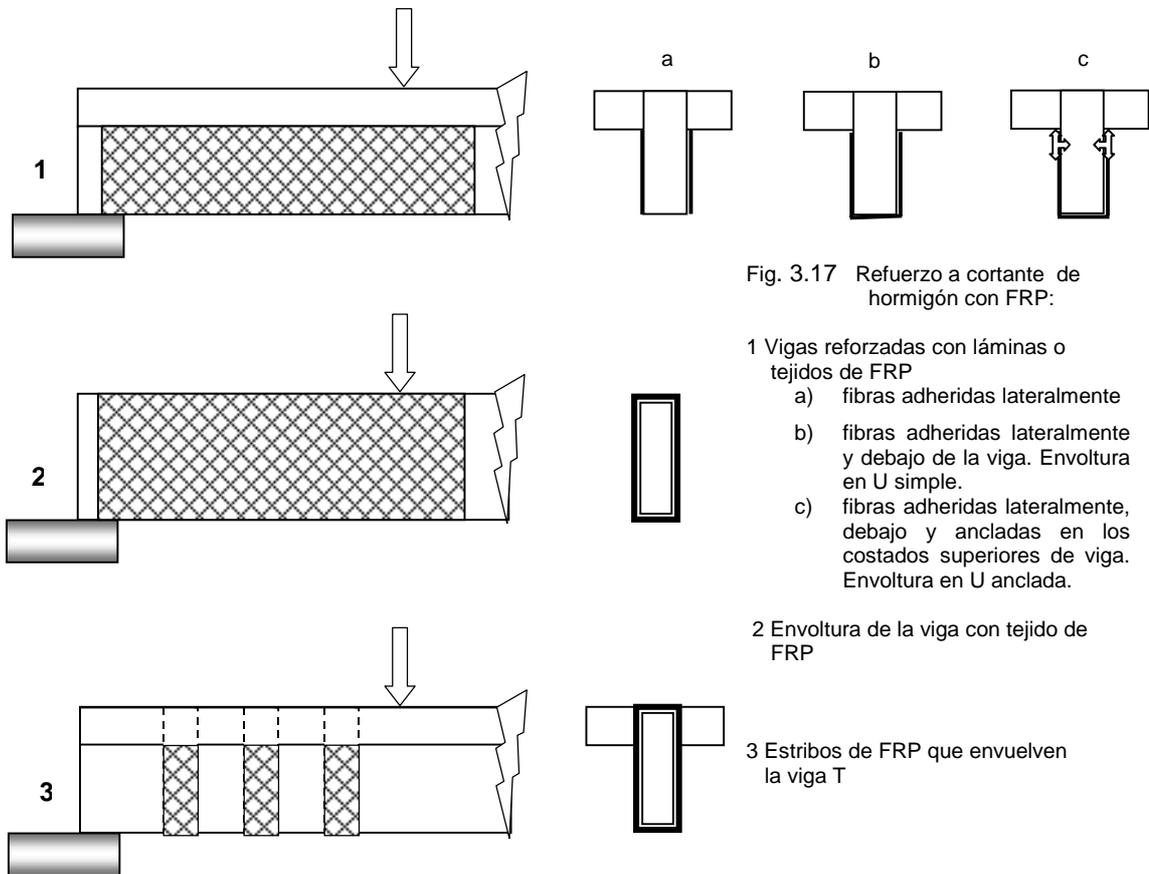


Fig. 3.17 Refuerzo a cortante de hormigón con FRP:

- 1 Vigas reforzadas con láminas o tejidos de FRP
 - a) fibras adheridas lateralmente
 - b) fibras adheridas lateralmente y debajo de la viga. Envoltura en U simple.
 - c) fibras adheridas lateralmente, debajo y ancladas en los costados superiores de viga. Envoltura en U anclada.
- 2 Envoltura de la viga con tejido de FRP
- 3 Estribos de FRP que envuelven la viga T

Para incrementar la base experimental de datos de refuerzo a Cortante en vigas de hormigón armado usando FRP, se han realizado una serie de pruebas en las cuales se diseñaron unas vigas con acero de refuerzo a cortante insuficiente y reforzadas con fibras de carbono en forma de tejido, adheridas al hormigón mediante resinas epóxicas.

Las vigas de este trabajo experimental (*Triantafillou, 1998*) tienen una longitud de 1,00m y fueron cargadas en cuatro puntos centrados entre dos apoyos distantes 0,80m y con una zona de cortante de 0,32m a ambos lados de la viga.

La figura 3.18 muestra un esquema de una viga reforzada.

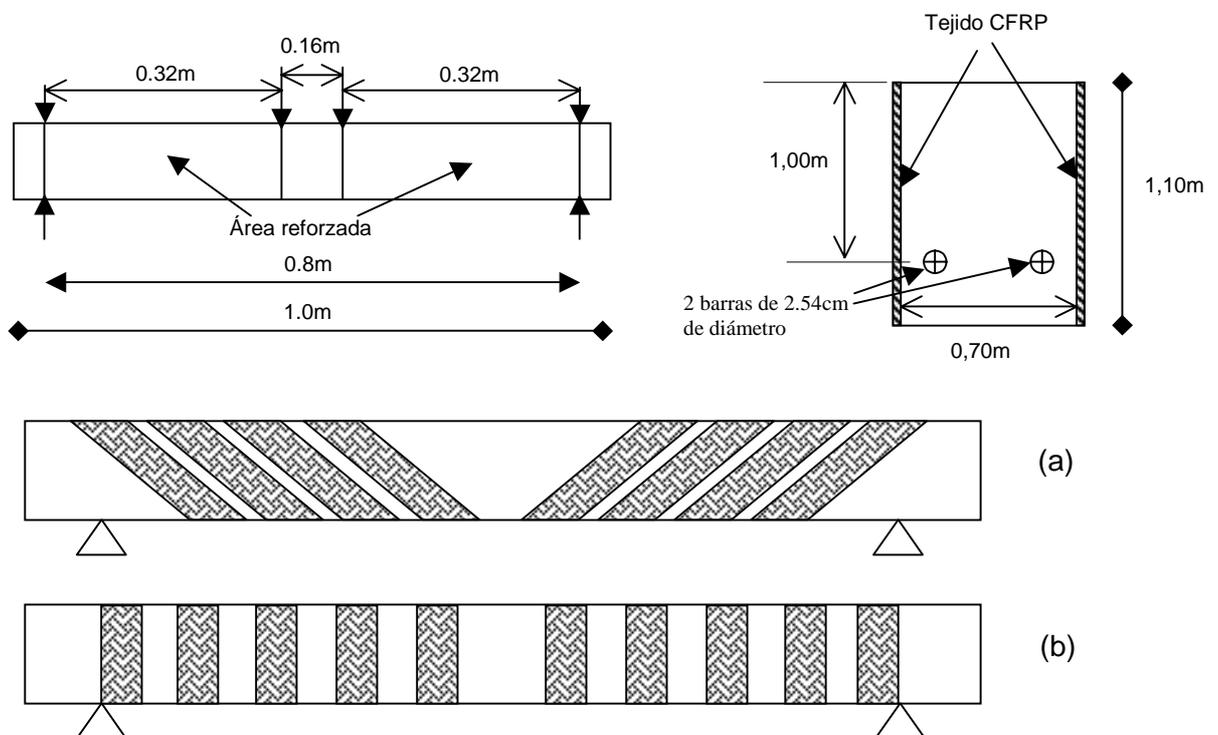


Fig. 3.18 Esquema de las vigas reforzadas a) láminas adheridas en diagonal 45°
b) láminas adheridas verticalmente 90°

El refuerzo a cortante fue proporcionado por fibras de carbono (CFRP) en forma de tejido (tapetes) hechos de fibras unidireccionales con adhesivos epóxicos. Las pruebas fueron realizadas aproximadamente 15 días después de elaborado el hormigón. De acuerdo con los datos provistos por el distribuidor de las CFRP, los tejidos tienen un modulo de 235 GPa y una resistencia a la tracción de 3300MPa. La aplicación de las fibras de refuerzo CFRP fue mediante los siguientes pasos:

- a) Remoción y eliminación de superficies ásperas por medio de un disco de desbaste o picado.
- b) Soplando la superficie de hormigón con aire a presión.
- c) Cubriendo la superficie del hormigón con una imprimación.
- d) Aplicando una masilla de resane después de aplicada la imprimación.
- e) Aplicando en dos partes el adhesivo epóxico
- f) Pegado de las láminas ó bandas a lo largo de la dirección de las fibras usando un rodillo plástico.
- g) Aplicando una segunda impregnación de resina.
- h) Removiendo el exceso de resina, usando un raspador de goma o corcho.

Cada viga tiene una sección transversal de 70mm de ancho y 110mm de altura. EL refuerzo longitudinal de acero consta de dos barras 8mm de diámetro de acero con límite elástico de 400 MPa, colocado a una profundidad de 100mm. La cantidad de acero a cortante proporcionado fue insuficiente con la finalidad de asegurar que la falla que gobierna, es por cortante. La carga de prueba fue aplicada con una velocidad de 0.02mm/seg. El mecanismo de falla en ensayos con refuerzo exterior con FRP se resume en la tabla 3.5 con todas las vigas diseñadas de prueba.

TABLA 3.5 MECANISMO DE FALLA		
TIPO DE FIBRA Y ÁNGULO DE ORIENTACIÓN	TIPO DE APLICACIÓN	MECANISMO DE FALLA
Vidrio 45°	Fibra adheridas a los costados	Cortante con desprendimiento de fibras
Vidrio 90°	Fibras adheridas a los costados y en la parte inferior	Cortante con fractura en el hormigón
Aramida 90°	Fibras adheridas a los costados y en la parte inferior	Cortante con fractura en el hormigón
Carbono 45°	Fibras adheridas a los costados y en la parte inferior	Cortante con fractura en el hormigón
Carbono 90°	Fibras adheridas a los costados y en la parte inferior	Cortante con desprendimiento de fibras y fractura de hormigón
Carbono 45°	Fibras adheridas a los costados	Cortante con desprendimiento de fibras
Carbono 90°	Fibras adheridas a los costados	Cortante con desprendimiento de fibras
Carbono 90°	Fibras adheridas envolviendo el alma de la viga	Cortante con fractura en el hormigón

Datos tomados de Triantafillou , 1998

Estas pruebas demostraron que el refuerzo de vigas de hormigón armado aplicando materiales compuestos en forma de tejidos adheridos con resinas epóxicas es una técnica altamente eficiente. Con los criterios de cálculo de armaduras en elementos de

hormigón armado, los refuerzos con FRP se pueden tratar en forma análoga como con el diseño de refuerzo interno a cortante. La contribución de las láminas de FRP al esfuerzo cortante es casi lineal con el producto módulo elástico por la deformación de las fibras.

Futuras investigaciones las enfocaran en difundir la base de datos experimentales en refuerzo a cortante en vigas de hormigón armado reforzadas con FRP. Se puede advertir que existe un gran vacío en estudio del comportamiento o interacción entre hormigón, resina y fibra, y por otra parte en definir la forma más adecuada de preparar la superficie de la zona de contacto del elemento estructural a reparar. (Triantafillou, 1998)

Ensayos similares a los anteriores han tenido como principal objetivo encontrar soluciones innovadoras que traigan avances significativos sobre métodos tradicionales particularmente en términos de desarrollo, simplicidad de realización, rapidez de ejecución y fácil de manipular. (Chaallal, 1998)

En términos generales las investigaciones están enfocándose principalmente al refuerzo a esfuerzos cortantes mediante al uso de láminas de CFRP como refuerzo externo lateral trabajando como estribos. (Chaallal, 1998)

Resultados de diferentes fuentes muestran la diferencia en el comportamiento de las fibras según la orientación de su pegado con respecto al eje longitudinal de las vigas. La gráfica siguiente muestra el comportamiento “carga VS flecha” de vigas de hormigón armado con las diferencias según se indica en la figura 3.19.

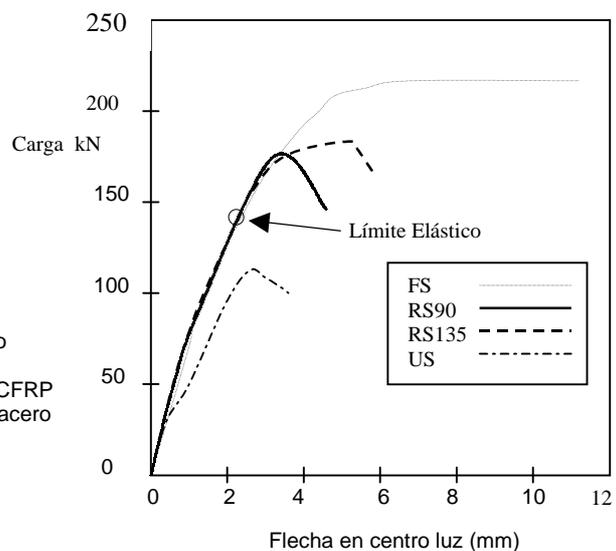


Fig. 3.19 Graficas carga (kN) VS flecha (mm)

FS.- Viga con refuerzo normal de estribos de acero
RS90.- Viga con refuerzo Vertical de CFRP
RS135.-Viga con refuerzo a 45° con la vertical de CFRP
US.- Viga con refuerzo insuficiente de estribos de acero

(O. Chaallal, 1998)

Comparando las gráficas RS90 y RS135 en la Fig.3.19 se puede observar, que las fibras con una adherencia a 45 grados tiene una capacidad de carga ligeramente mayor y su deflexión antes de la falla aumenta considerablemente con poco incremento de carga, teniendo una falla mucho más dúctil que con las láminas de FRP adheridas verticalmente.

3.7.2 Aplicaciones en Mampostería

En otros estudios de aplicación de láminas de FRP pero en mampostería, se realizaron ensayos donde se registró un comportamiento semejante de la orientación de las fibras tal y como se indica en la gráfica siguiente.(figura 3.20)

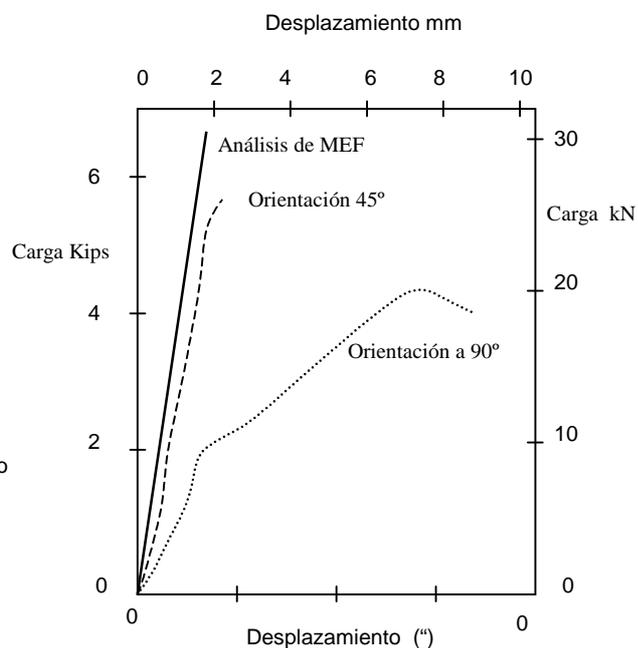


Fig. 3.20 Gráficas Carga VS Desplazamiento FEM.- Método del elemento finito
45°.- Orientación de la fibra FRP
90°.- Orientación de la fibra FRP
(Ehsani, 1997)

En estos estudios realizados en mampostería se tendió a centrarse en los ensayos con fibras orientadas a 45° y se pudo observar en los ensayos, que la falla se presentaba por cortante puro, y no por delaminación (falla por adherencia entre la FRP y el bloque), teniéndose un comportamiento linealmente elástico durante la aplicación de la carga.

Mediante el análisis por elementos finitos puede verse que los esfuerzos están uniformemente distribuidos a lo largo de las uniones. En la figura siguiente, se puede ver un croquis del tipo de ensayo en mampostería. (Ehsani, Saadatmanesh, Al-Saidy (1997))

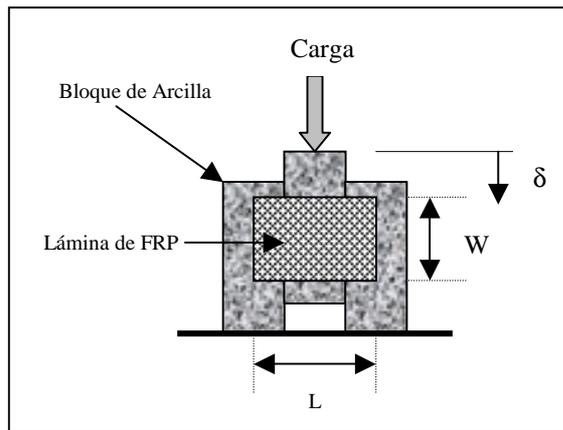


Fig. 3.21 Croquis del tipo de ensayo en mampostería

A diferencia de los resultados obtenidos en la Universidad de Québec (figura 3.19), aquí se puede observar que las láminas de FRP orientadas verticalmente presentaron una mayor ductilidad antes de la falla y una resistencia ligeramente menor, lo cual requiere de un estudio más minucioso.

Como punto a favor para las láminas de FRP orientadas a 45° se puede observar que tienen un comportamiento más elástico lineal, y como desventaja se tiene una falla muy frágil, lo cual se puede observar en la Fig.3.22.

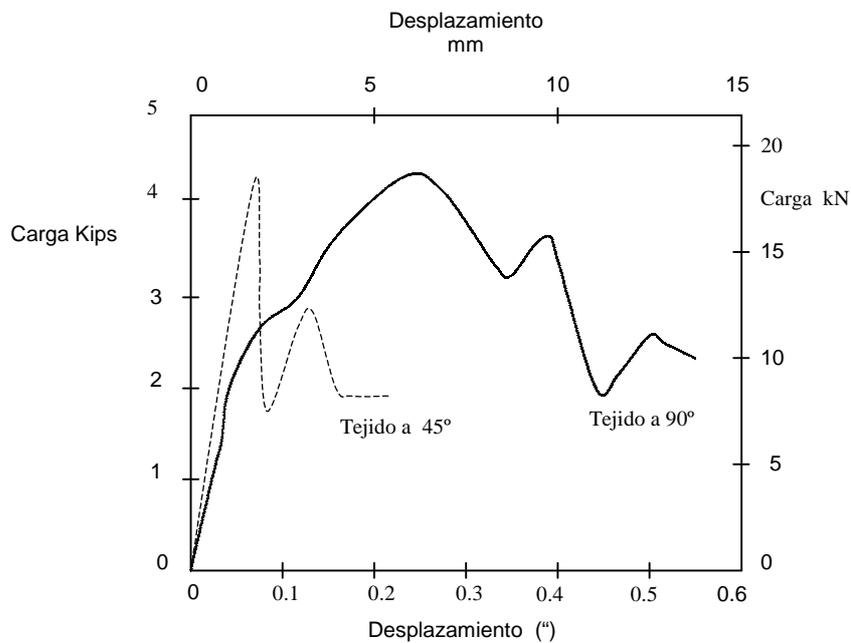
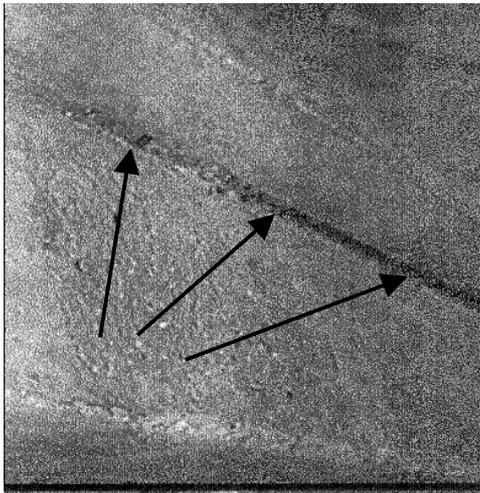


Fig. 3.22 Gráfico comparativo del comportamiento elástico de acuerdo a la orientación del FRP (Ehsani, 1997)

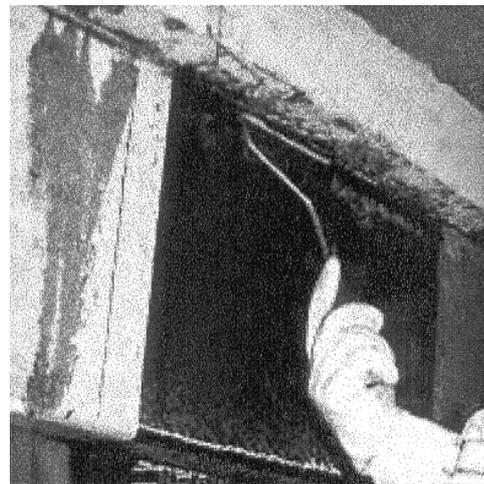
En general, no se instrumentaron las láminas de FRP, lo cual hubiera sido de mucha ayuda para poder conocer mejor el comportamiento de las fibras durante la aplicación de los esfuerzos durante y después de la falla.

3.7.3 Refuerzo a cortante con láminas de CFRP ancladas

En el caso de los trabajos experimentales en la Universidad de Missouri – Rolla (Khalifa, Alkhrdaji, Nanni, Lansburg, (1999)); (Raghu, Mylers, Nanni (2000)), se realizó un estudio comparativo de dos sistemas diferentes de refuerzo mediante fibras de refuerzo plástico donde se utilizaron unos refuerzos anclados y otros no, tal como lo muestra la figura 3.23



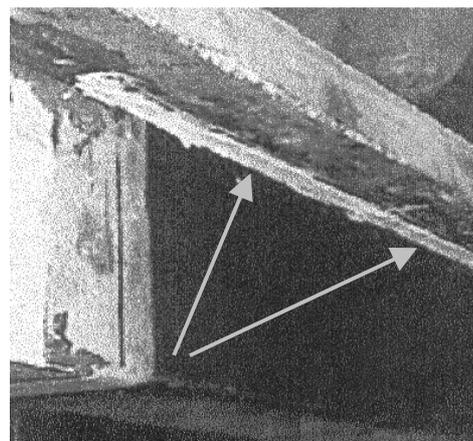
a) Preparación de la ranura para el ribete de la viga para anclar la lámina de CFRP que señalan las flechas



b) Aplicación de láminas de CFRP en envolturas en U hasta la zona de anclaje en el ribete.



c) Inserción de la barra de FRP de vidrio en la ranura.



d) Relleno de la ranura con pasta epóxica que señalan las flechas.

Fig. 3.23 Descripción del anclaje de láminas de CFRP en los extremos de la viga (Khalifa, Akhrdaji, Nanni, Lansburg, 1999)

Las pruebas realizadas han demostrado la viabilidad de usar envolturas U externas garantizando su incremento en la capacidad de carga en vigas de hormigón armado. En particular las siguientes conclusiones pueden obtenerse basándose en el comportamiento observado:

1. Reforzando la viga usando envolturas U de láminas de FRP se puede incrementar la resistencia a cortante.
2. Los elementos reforzados exhiben un incremento en la capacidad de cortante sobre los elementos que no están reforzados en un rango del 11% al 34% dependiendo de la técnica del sistema de refuerzo que fuera usado para reforzar.
3. El incremento en el número de capas no resulta en un incremento dramático en la capacidad a cortante para vigas con o sin anclaje en sus extremos.
4. Las vigas reforzadas con láminas ancladas con envoltura U simple, tienen un mejor funcionamiento que las vigas sin anclar con doble envoltura U en un 17%.
5. Las vigas reforzadas con láminas ancladas con envoltura U simple, tienen un mejor comportamiento que las vigas reforzadas con láminas ancladas con envoltura U doble en un 4%.

Entiéndase por envoltura simple aquel refuerzo con tejido de fibra de una sola capa que cubre los costados y la parte inferior de la viga, y por envoltura doble el refuerzo con una doble capa de tejido de fibras que cubre los costados y la parte inferior de la viga.

Los trabajos siguientes (Khalifa, Nanni, 1999) se enfocaron a estudiar el comportamiento a cortante de vigas de sección T de hormigón armado cuando éstas son reforzadas con láminas de CFRP con distintas configuraciones, ya sean mediante la aplicación de capas a 90° , 0° , la combinación de ambos y el anclaje en los extremos de las láminas de CFRP. Las diversas configuraciones se observan en la figura 3.24.

Los resultados experimentales mostraron que la adherencia externa de láminas de CFRP puede incrementar la capacidad a cortante de las vigas en una forma significativa. En conclusión, los resultados indican que la configuración más efectiva fue la de envoltura en U con la fibra anclada en sus extremos, la que se recoge en la letra C de la figura 3.24

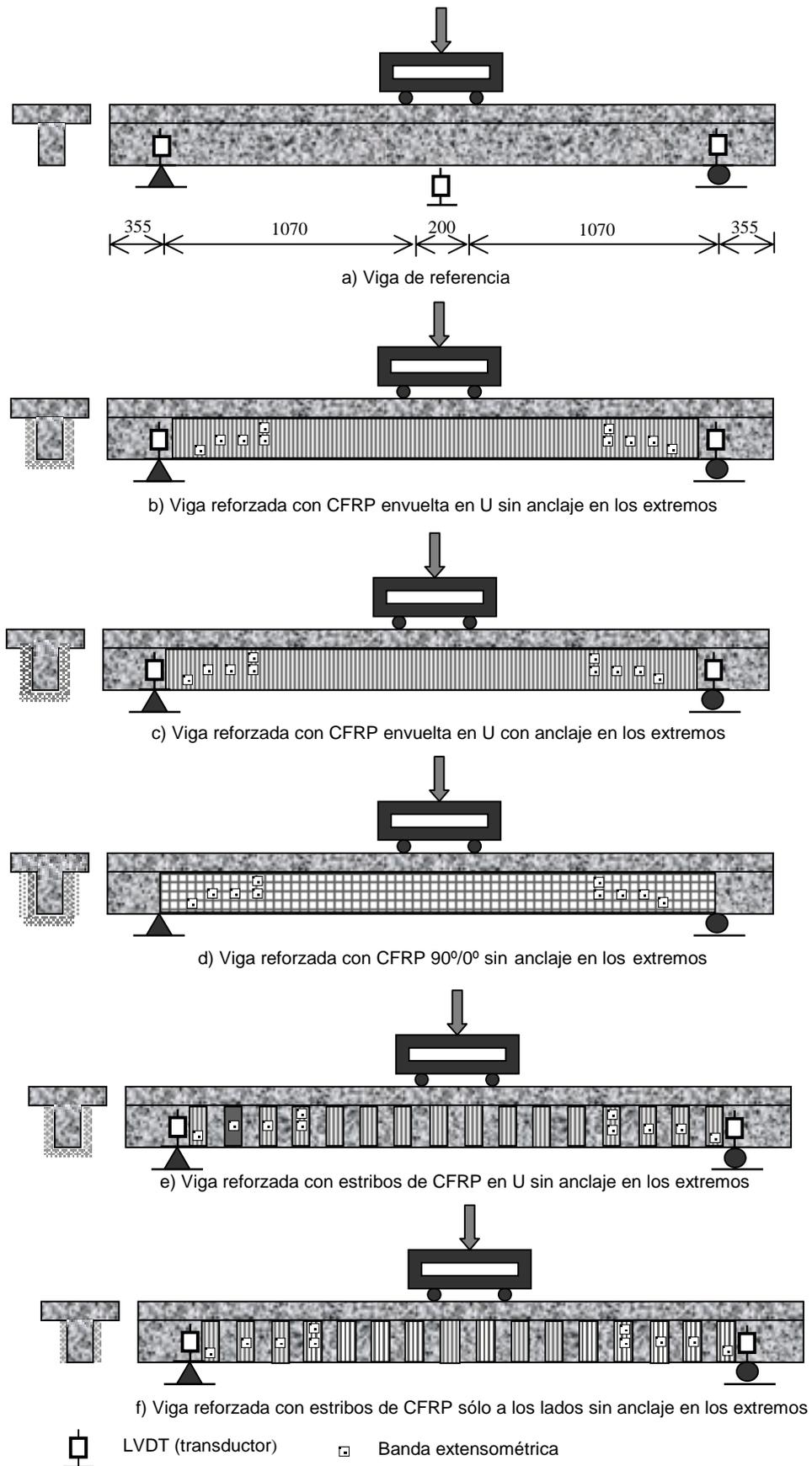


Fig. 3.24 Disposición de ensayos y esquema de refuerzos (Khalifa, Nanni, 1999)

En resumen, el sistema de anclaje U provee de una solución efectiva para casos en que la adherencia longitudinal de compuestos de FRP no son suficientes para desarrollar la capacidad total o se requiere el anclaje a miembros adyacentes.

El anclaje U puede ser usado con láminas de FRP y láminas previamente curadas que estén despegadas o totalmente pegadas al hormigón. Esto está basado en la idea de embeber en la preforma de la ranura en el hormigón (o mampostería) un doblez de la porción del final de la lámina de FRP de refuerzo. La discontinuidad es rellena con una pasta viscosa y puede o no puede incluir una barra de FRP. En el caso de las láminas, el doblez se crea durante el mojado de la lámina y; en el caso de los laminados, es previamente formado. El anclaje U es compatible con el sistema de FRP de refuerzo y evita la alta concentración de esfuerzos y problemas de durabilidad.

Un ejemplo de verificación experimental fue utilizado para mostrar la fiabilidad y efectividad del sistema propuesto en incrementar la capacidad de cortante de vigas de hormigón reforzado con anclaje de envoltura U de CFRP. Para una viga reforzada con el sistema envoltura U de FRP sin anclaje, su capacidad de resistencia a cortante se incrementó, pero su falla fue gobernada por el desprendimiento de la lámina CFRP. En el elemento donde se utilizó anclaje, la capacidad de cortante del miembro se incrementó y se observó hasta el final que no desprendió la lámina FRP. (*Khalifa, Alkhrdaji, Nanni , Lansburg. (1999)*)

Las fotografías siguientes muestran los tipos de falla, comparando la falla de la viga de referencia con respecto a las fallas en las vigas con anclaje y sin anclaje. (ver figuras 3.25, 3.26 y 3.27)

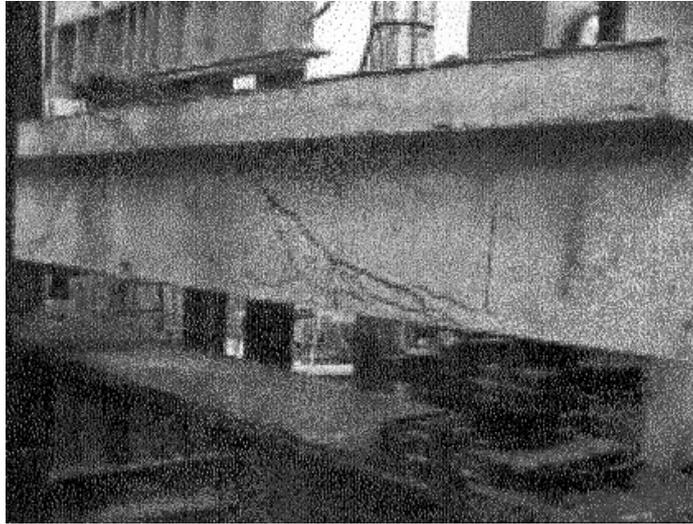


Fig. 3.25 Viga de referencia (sin refuerzo de CFRP)
Khalifa, Alkhrdaji, Nanni, Lansburg. (1999)



Fig. 3.26 Viga con láminas CFRP sin anclar en sus
extremos, desprendieron de la parte superior.
Khalifa, Alkhrdaji, Nanni, Lansburg. (1999)



Fig. 3.27 Viga con láminas CFRP con anclaje en sus extremos impidiendo el desprendimiento del laminado, permitiendo desarrollar esfuerzos mayores en el hormigón.

Khalifa, Alkhrdaji, Nanni, Lansburg. (1999)

3.7.4 Adherencia entre láminas de CFRP y hormigón

El siguiente trabajo (*Miller, 1999*) presenta una investigación referente a la distribución de esfuerzos entre las láminas de polímeros reforzados con fibras de carbono y el hormigón. Las Láminas de CFRP son usadas como un refuerzo adherido externamente para mejorar las capacidades de cortante, flexión y confinamiento del hormigón.

Los objetivos, en este trabajo están centrados en encontrar los factores que afectan la adherencia entre las láminas de CFRP y el Hormigón. Entre ellos se puede citar:

- Longitud de la superficie de adherencia
- Esfuerzos de compresión del hormigón
- Numero de capas de láminas de CFRP

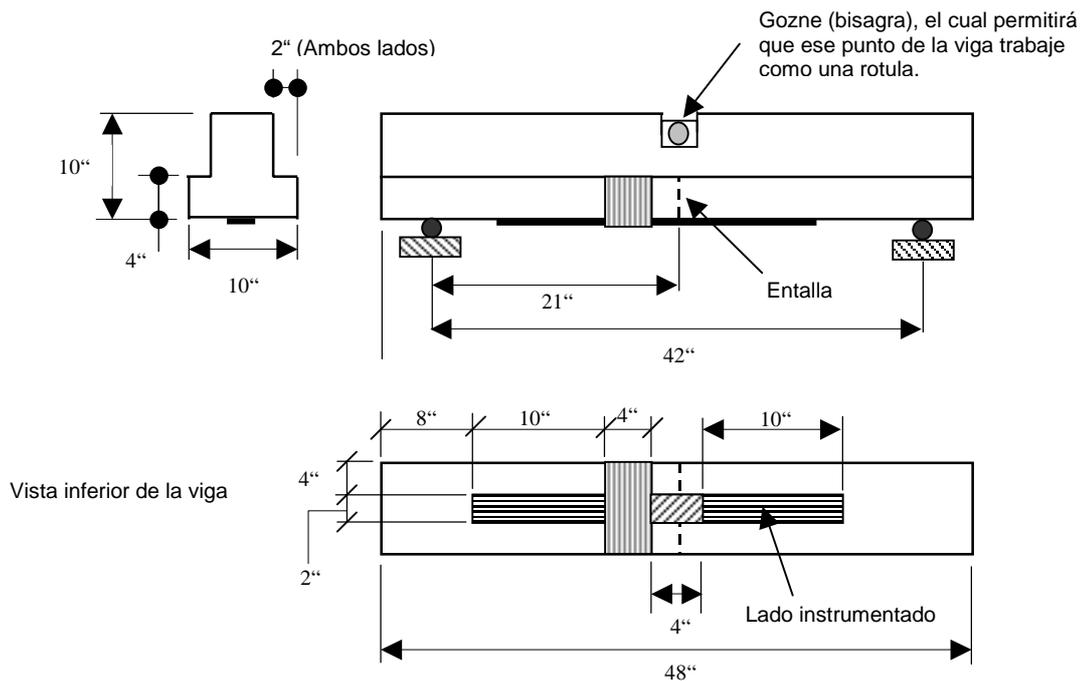


Figura 3.28 Esquema de probeta de prueba. La probeta es ranurada por el centro para condicionar mayores tracciones de la fibra en esa zona. También, en el centro la viga en la zona marcada a rayas diagonales, no está adherida la fibra. La fibra está anclada por el extremo izquierdo, con la finalidad de producir los mayores esfuerzos en la fibra del lado derecho, el cual está instrumentado.

El esquema del ensayo es el de la figura 3.28 ,y como conclusiones de estos ensayos, se observó que:

- 1) La longitud adherida no tiene ningún efecto en la carga última de la lámina.
- 2) La resistencia del hormigón no afecta la carga última.
- 3) La falla ocurre en la interfase hormigón adhesivo.
- 4) Incrementando el número de capas, se incrementa la rigidez y la adherencia, pero no es proporcional al número de capas.

3.7.5 Aplicación en Puentes

Proyectos de refuerzos recientes están demostrando que los compuestos de CFRP están generando una aceptación en la rehabilitación de edificaciones e infraestructuras (Nanni, 2000). Los siguientes ejemplos muestran la adaptabilidad de la tecnología de CFRP a diferentes situaciones: correcciones de errores de diseño o construcción y pérdida de integridad debido a colisiones vehiculares. Cuando la tecnología madure, un campo de aplicación igualmente importante es la prevención de daños.

La figura 3.29 muestra los efectos de un impacto vehicular en cuatro de las vigas maestras de un viaducto. Este es un puente de 10.5 m de luz, hecho de cuatro vigas maestras de hormigón pretensado, teniendo unas dimensiones de 1 por 1.5 m de sección transversal. El refuerzo convencional (tendones de pretensado y barras de refuerzo) es limpiado visiblemente como muestra la fotografía y después fue removido el hormigón suelto.

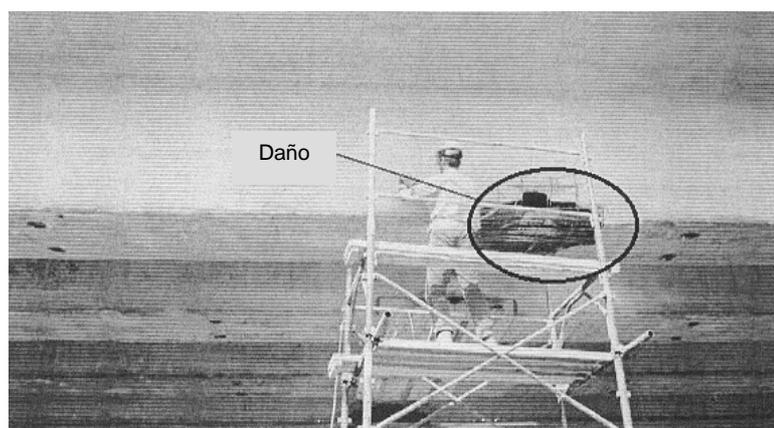


Fig. 3.29 Daño en viga maestra debido a impacto vehicular

El hormigón de la sección transversal fue restaurado con un mortero sin retracción y después se preparó superficialmente. Las láminas de CFRP unidireccionales fueron adheridas como se muestra en la figura 3.30. El objetivo de reforzar fue para reparar la pérdida de pretensado. Para cada viga, tres láminas, de 0,33 m de ancho y 3,0 m de longitud, fueron adheridas a la zona reparada con la alineación paralela a la dirección de la viga y cuatro estribos de 0,16 m de ancho y 3,0 m de longitud, fueron envueltas rodeando tres de sus lados con fibras alineadas perpendicularmente a la dirección de la viga. La cantidad total de CFRP usada fue aproximadamente de 20 m².

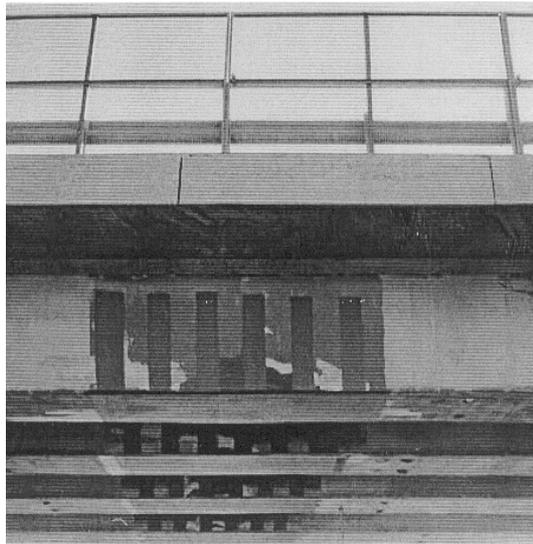


Fig. 3.30 Forma estándar de estribos de CFRP

Reparación de columnas cortas que transfieren carga de la losa de hormigón armado al arco de hormigón armado a lo largo del viaducto de la histórica “Via Flaminia”, cerca de Spoleto. Dicho puente fue construido después de la segunda guerra mundial. La figura 3.31 muestra una toma del puente, donde la hilera de columnas cortas visibles en el centro de la fotografía representan el área de interés.

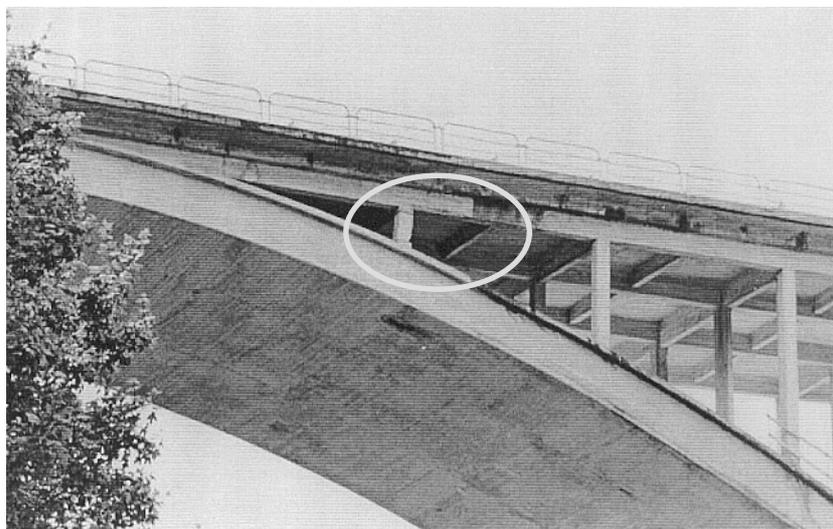


Fig. 3.31 Vista del puente. El ovalo señala la zona afectada

Estas columnas tienen una sección transversal de 0,4m por 0,4m y de 1,65 m de altura. La figura 3.32 ofrece una detallada imagen del nivel de deterioro de las

columnas cortas. El hormigón de alrededor se desconchó debido a la corrosión del acero de refuerzo.

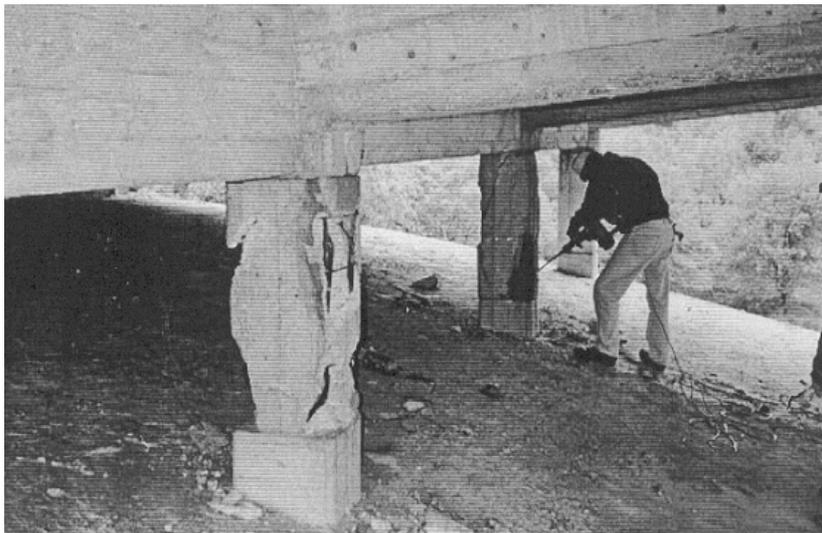


Fig. 3.32 Columna deteriorada

Después de retirar todo el material deteriorado, la sección transversal original fue restaurada con mortero sin retracción por fraguado y el acero de refuerzo fue protegido con una capa pasiva. Finalmente, las columnas fueron envueltas sólo por una capa de lámina de CFRP como se muestra en la figura 3.33.

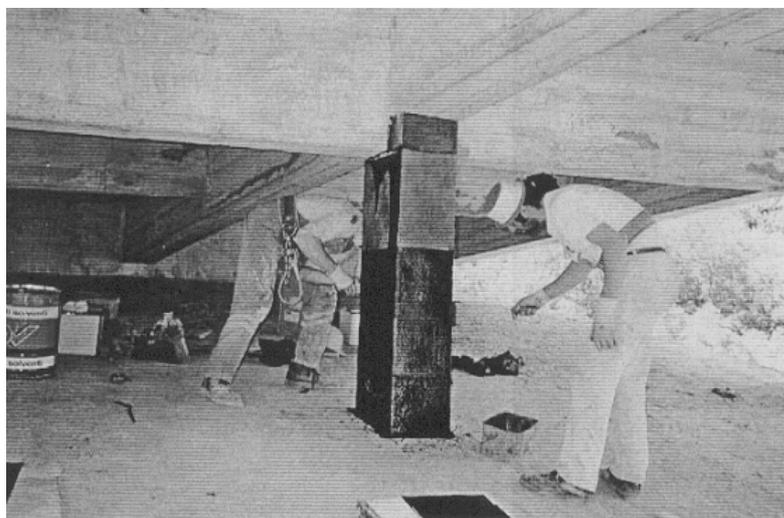


Fig. 3.33 Aplicación de la CFRP a la columna

La configuración de refuerzo de esta columna es tal que al final actúa como biela, por lo tanto la envoltura de CFRP con la fibra transversal, sólo es un medio ideal que suministra un confinamiento del hormigón sin agregar ninguna rigidez a flexión ó la capacidad de absorber momentos en la localización de la biela.