

2

Capítulo

Estado del Conocimiento

2 Estado del Conocimiento

La investigación bibliográfica realizada en este proyecto tratará tres puntos fundamentales; el primero se relaciona con el pretensado exterior en puentes construidos por dovelas prefabricadas, el segundo tema referente al refuerzo de estructuras de hormigón y por último, el tercero que trata sobre el refuerzo a flexión de estructuras de hormigón con materiales compuestos de FRP.

2.1 Puentes de Dovelas con Pretensado Exterior

2.1.1 Breve reseña histórica del pretensado exterior

El pretensado exterior en puentes se aplicó por primera vez en 1936, cuando el ingeniero alemán Franz Dischinguer lo aplicó en el puente Adolf Hitler, en Aue (Alemania) [SCHÖNBERG, 1939]. Tras éste, se construyeron muchos puentes más todavía en servicio, entre los que hay que destacar el puente sobre el río Duero en Almarail, proyecto de Eduardo Torroja y Alfredo Páez [ATEP, 1970]; pero los problemas de corrosión de los tendones frenaron la aplicación de esta técnica durante los años sesenta y setenta. Sin embargo, el pretensado exterior se ve de nuevo potenciado por su aplicación para refuerzo de puentes y para la construcción de edificios de contención de centrales nucleares. En efecto, esta técnica se empieza a aplicar nuevamente para reforzar diversos puentes construidos por la técnica de los voladizos sucesivos, donde la infravaloración de la fluencia había causado fisuración y deformaciones excesivas [VIRLOGEUX, 1993^a] o en puentes con problemas de corrosión de tendones [BRUGGELING, 1990]. Además, en Estados Unidos se utiliza el pretensado exterior como una técnica interesante para la construcción de edificios de contención de centrales nucleares, por las ventajas que presenta la no adherencia entre

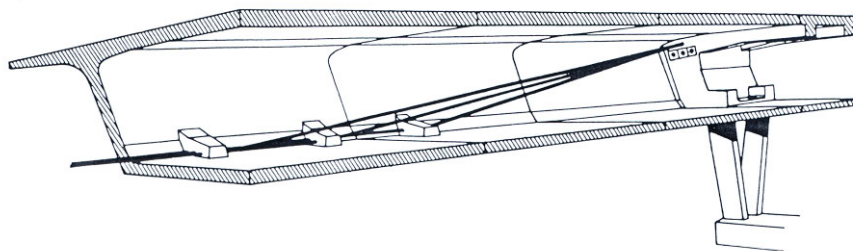


Figura 2.1. Long Key Bridge. Disposición del pretensado exterior

acero y hormigón a la hora de realizar una inspección y un posible retesado [APARICIO, 1995].

Al final de los años setenta, Fritz Leonhardt propone usarlo en los puentes construidos por empuje de dintel como un pretensado exterior provisional de construcción centrado (puentes de Aiguilly, Bléré y Koilu) o antagónico al pretensado interior definitivo (puente de Sathorn) [VIRLOGEUX, 1990]. Fue Jean Muller quien a principio de los años ochenta diseña el Long Key Bridge, en Florida (figura 2.1), donde el pretensado exterior fue aplicado por primera vez a un puente de dovelas prefabricadas con juntas secas. Desde entonces se han construido muchos puentes de luces medias con pretensado exterior en Europa y Estados Unidos, la mayoría de ellos con dovelas prefabricadas [APARICIO, 1993].

2.1.2 El pretensado exterior

El pretensado exterior no adherente es una técnica de presolicitación donde los cables quedan dispuestos fuera de la sección transversal de hormigón. El trazado de los cables no es parabólico, sino poligonal, cambiando de dirección en los desviadores, como se aprecia en la figura 2.2. Se diferencia por tanto del pretensado interior, en el cual los tendones discurren dentro de la sección y donde la inyección de mortero asegura la compatibilidad entre acero y hormigón; y del atirantamiento inferior y del pretensado extradadoso donde los tirantes superan el canto de la pieza. Es por consiguiente, y según Aparicio (1995), un pretensado constituido por tendones de armadura postesa, anclados

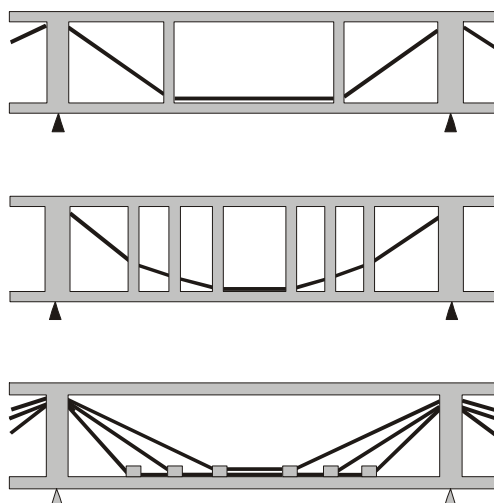


Figura 2.2. Distintos trazos con pretensado exterior [VIRLOGEUX, 1993^a]

mediante anclajes similares a los utilizados en pretensado convencional en determinados puntos de la estructura, donde los tendones, normalmente de acero duro en cordón, discurren entre los anclajes contactando con el tablero del puente, además de en éstos, en puntos discretos denominados desviadores, ejerciéndose las fuerzas compensatorias del pretensado sólo sobre estos puntos determinados. El número de estos desviadores resulta de un compromiso entre el peso que introducen en la estructura y la posibilidad de adoptar un trazado de los tendones homotético a la ley de momentos flectores.

La corrosión, que en su día fue la causa de que el pretensado exterior cayera en desuso, se evita introduciendo los tendones en vainas e inyectándolas posteriormente. Las vainas pueden ser principalmente de polietileno de alta densidad (PEHD) o metálicas. Entre los productos utilizados para las inyecciones destacan las ceras petrolíferas y el mortero de cemento. Otra posible protección contra la corrosión consiste en el empleo de monotorones autoprotectidos, con un atractivo añadido que consiste en que su tesado se puede realizar con un gato alevín fácilmente manejable [APARICIO, 1993].

2.1.3 Aplicación del pretensado exterior a puentes de dovelas

En los puentes convencionales de dovelas con pretensado interior adherente, donde la única armadura que cruza la junta es el pretensado interior, la protección contra la corrosión se confía a la inyección de la vaina y a la resina epoxi, que se extiende a mano sobre la superficie de contacto de las dovelas. La colocación de esta resina, que requiere unas condiciones ambientales específicas para su polimerización, se realiza de forma

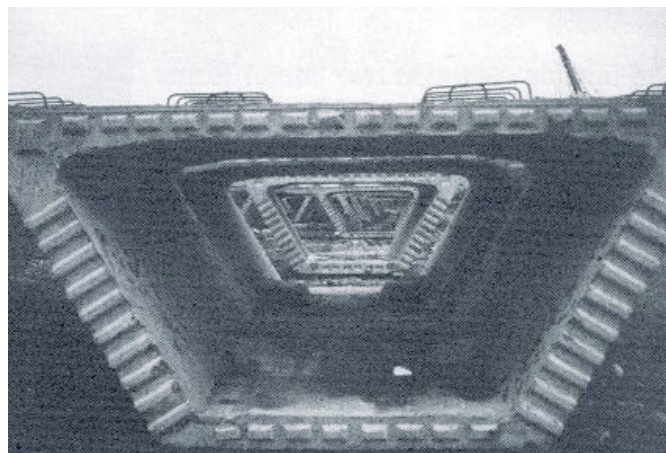


Figura 2.3. Dovelas con llave de cortante [MULLER, 1993]

manual y previamente a la colocación de la dovela contigua. Para asegurar un adecuado contacto entre las dos dovelas y para expulsar el excedente de resina en la junta se aplica a las dovelas contiguas un pequeño pretensado parcial con barras [ROBERTS, 1993]. Todo esto implica que la colocación de la resina es una tarea engorrosa que requiere bastante tiempo, impide construir en tiempo frío y entraña riesgos de que la resina no cumpla con su cometido, bien por una colocación ineficiente de la resina, bien por una mezcla inadecuada de sus componentes [NEWS-RECORD, 1979].

El hecho de que la vaina de pretensado no atraviese las almas de la sección, facilita la labor de hormigonado [BRUGGELING, 1990], permitiendo la vibración por aguja de manera más cómoda y evitando la aparición de coqueras por acumulación de aire bajo las vainas [APARICIO, 1995]. El volumen y el peso de las dovelas prefabricadas impiden la posibilidad de una vibración eficiente del molde, imponiéndose la vibración por aguja.

Las pérdidas por rozamiento son menores que las del pretensado interior [VIRLOGEUX, 1990]. En el pretensado convencional influyen dos variables, el ángulo girado por su trazado, voluntariamente diseñado, así como los ángulos no deseados que toma la vaina entre puntos de amarre que dan lugar a desviaciones parásitas. En el pretensado exterior, al presentar un trazado recto entre anclajes y desviadores, no existen desviaciones parásitas [APARICIO, 1995]. Además los tendones están mejor protegidos de la corrosión, porque ya no hay que confiar en la resina epoxi, debido a que la vaina es continua.

Además, el estado de un puente con pretensado exterior se puede evaluar mediante sencillas técnicas de auscultación, que van desde la inspección visual hasta medir la tensión del cable con el método de la cuerda vibrante [APARICIO, 1995].

2.1.4 Puentes de dovelas con pretensado exterior y junta seca.

La consideración de todas estas ventajas citadas anteriormente dan como fruto una nueva tipología estructural de puente: el puente de dovelas prefabricadas de hormigón con pretensado exterior y junta conjugada, cuya principal aportación es la rapidez de su proceso constructivo, y cuyo primer ejemplo construido fue el Long Key Bridge, en

Florida, con una longitud total de 3,7 kilómetros y 103 vanos de unos 36 metros [MULLER, 1980].

2.1.4.1 Construcción

Los puentes de dovelas sin pretensado interno, sin armadura pasante, sólo con pretensado exterior, que no necesitan resina epoxi ya que la protección contra la corrosión se la confieren las vainas y la inyección, permiten la puesta en práctica de un “nuevo” sistema constructivo. En éste, las dovelas prefabricadas son colocadas a tope unas con otras y ensambladas por el pretensado, pasándose tras esta etapa la cimbra o la celosía metálica al vano siguiente (figura 2.4). Las luces de construcción son unas luces medias de unos 40 metros, siendo la limitación el peso y el precio de la cimbra. Para aprovechar las economías de este tipo de construcción, se requiere que los puentes sean largos [VIRLOGEUX, 1990]. La longitud de las dovelas varía entre 3 y 6 metros, siendo su longitud determinada por el proceso de transporte desde el parque de prefabricación hasta la obra (por carretera en un caso, por barcazas en otro). La principal ventaja de este tipo de puentes es la rapidez del proceso constructivo, ya que, al no tener que extender la resina a mano, todas las dovelas que componen un vano se ponen una a continuación de la otra y se pretensan, siendo el ritmo medio de dos vanos por semana [CARTER, 1987]. En Estados Unidos, donde no existe capa de rodadura, la resina tiene otra función, y es la de evitar que el agua entre en las juntas y se congele, por lo que estos puentes sólo pueden usarse en climas cálidos. En España, la existencia de una capa de rodadura e impermeabilización evita la entrada de agua en las juntas.

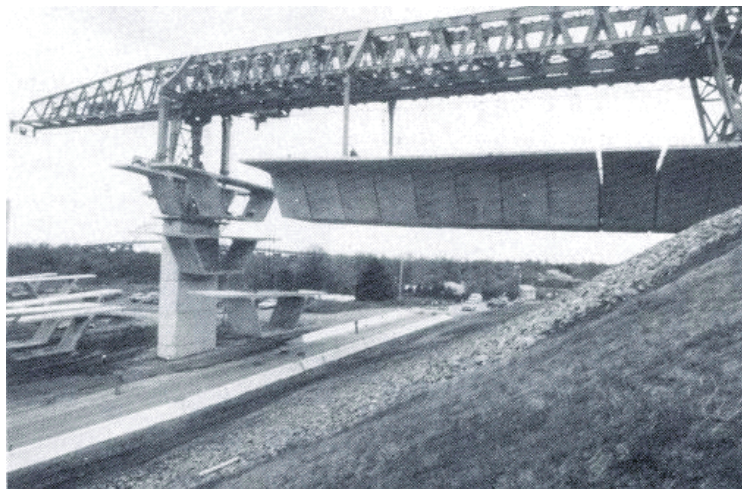


Figura 2.4. Construcción de un puente de dovelas con junta seca [CORVEN, 1993]

Otra limitación del proceso constructivo es la curvatura del vano, que forzosamente está limitada por la cimbra o viga auxiliar en la que se apoya, que es recta.

El proceso de fabricación de las dovelas requiere el uso de costosos medios auxiliares. Por un lado, la dovela ya hormigonada sirve como encofrado de la nueva dovela a hormigonar, y que será la que se encuentre a su lado en el puente construido. De esta manera, la geometría de las dos caras en contacto se adaptará perfectamente. Por otro lado, la geometría del puente se consigue en el parque del prefabricado, por lo que un complicado sistema de gatos orienta la dovela ya hormigonada que servirá de encofrado, para que una vez que sea hormigonada la nueva dovela, el vano refleje el trazado de proyecto [THOMPSON, 1998].

2.1.4.2 Comportamiento estructural

Sin necesidad de explicar el procedimiento de cálculo exhaustivamente en este apartado, se ha de comprender que cualquier deformación en el acero se reparte a lo largo de la longitud del cable (o al menos entre dos extremos que puedan considerarse fijos), ya que no hay adherencia con el hormigón. Esto implica que la tensión en el acero se incrementa, pero no tanto como en las estructuras con pretensado interior.

Otra diferencia con el pretensado interior es que el pretensado exterior no participa en el control de la fisuración local [FALKNER, 1993]. A su vez no se ve afectada por la fisuración.

Ante cargas de servicio, estos puentes se dimensionan para que cumplan el estado límite de descompresión, y las secciones mantengan una compresión mínima de 0.5 MPa y las juntas permanezcan cerradas. Así también se cumple el criterio de deformabilidad, los incrementos de tensión en el cable son despreciables, no hay problemas de fatiga ni en cables ni en anclajes y no se produce deslizamiento entre vainas y desviadores, ya que existe un cierto rozamiento entre ellos que los pequeños incrementos de tensión no logra vencer [RAMOS, 1994].

Cuando la sobrecarga aumenta hasta alcanzar los niveles de Estado Límite Último las juntas se abren ostensiblemente (figura 2.5), la estructura pierde rigidez rápidamente y

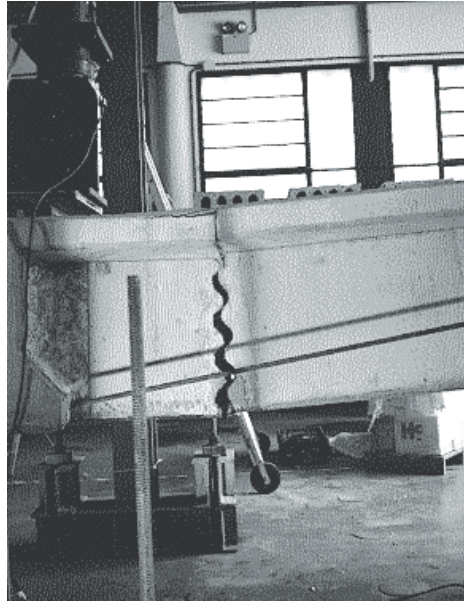


Figura 2.5. Junta de dovelas antes de rotura (LTE-UPC)

alcanza una flecha considerable [RAMÍREZ, 1989]. Estas deformaciones no se transmiten a los tendones cuya tensión apenas se ve incrementada. Al existir rozamiento entre tendones y desviadores cada tramo de cable que compone la poligonal va aumentando su tensión de manera independiente hasta que llegado un momento las diferencias de tensión entre dos tramos contiguos de cable superan el rozamiento y se produce el deslizamiento [RAMOS, 1994]. Las recomendaciones para tener en cuenta estos incrementos de tensión para su aplicación en proyecto según Aparicio (1993), son de 110MPa en caso de puentes isostáticos, y de 40MPa en caso de puentes continuos, incrementos claramente inferiores a los de los tendones internos adherentes. Algunos códigos llegan a despreciar totalmente estos incrementos de tensión [BPEL-91, 1992].

Además no hay armadura pasiva que cruce la junta. De ahí que los momentos flectores tengan que ser resistidos bien por más armadura activa bien por mayores tensiones iniciales en el acero, siendo no el ELS de descompresión, sino el ELU de solicitaciones normales el que guía el diseño.

La transferencia de cortante a través de juntas abiertas es un tema más complejo. La teoría universalmente aceptada propone que el cortante es transmitido por las juntas mediante dos mecanismos independientes denominados rozamiento y cohesión [FOURE, 1993].

El primero representa la fuerza de rozamiento que surge cuando dos superficies comprimidas intentan deslizar la una con respecto a la otra. El segundo recoge el efecto del apoyo de las llaves de cortante. En efecto, las dovelas están provistas de unas pequeñas indentaciones (de entre 4 y 6 centímetros de altura) [AASHTO, 1989] cuyo pequeño tamaño impide que estén adecuadamente armadas. Estas llaves permiten la transferencia de cortante cuando están en contacto una con otra. Con momento flector creciente, las juntas se abren y las llaves van perdiendo contacto poco a poco, reflejándose en el término de la cohesión sólo aquellas que se encuentran en contacto. El cortante último de respuesta está íntimamente relacionado con las solicitaciones normales y con el momento flector actuante. Para la misma carga actuante, (igual cortante e igual momento flector en la junta) cuanto mayor sea la tensión en el acero, mayor será la compresión en el hormigón y más baja será la fibra neutra (con momentos positivos), incrementando la resistencia a cortante. La presencia de muchas de estas pequeñas llaves es mucho más eficaz que la existencia de pocas llaves pero más grandes [KOSEKI, 1983].

La ecuación que rige la resistencia última a cortante es:

$$V_u = \mu N_c + C \quad (2.1)$$

donde,

- V_u = Resistencia última a cortante
- μ = Coeficiente de rozamiento hormigón- hormigón
- N_c = Compresión en el hormigón
- C = Resistencia de las llaves de cortante en contacto

Aunque el mecanismo de transmisión de cortante es cualitativamente conocido y no se discute, cuantitativamente no está determinado con precisión. Así, algunos autores difieren en la valoración de:

- a. El coeficiente de rozamiento hormigón-hormigón. Mientras algunos autores le dan un valor constante [AASHTO, 1977; ACI 318-77, 1977; PCI, 1978] otros lo hacen depender de la resistencia del hormigón [BREEN, 1993].

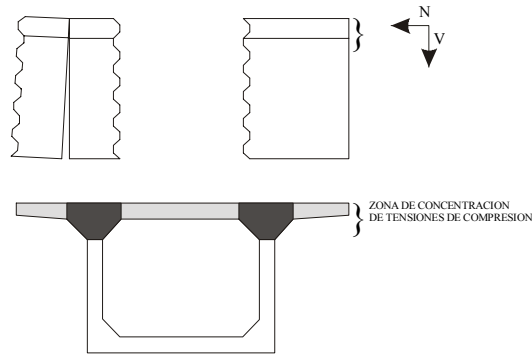


Figura 2.6. Zona comprimida de una sección (gris claro); zona capaz de transmitir cortante (gris oscuro) [VIRLOGEUX, 1993^c]

- b. Area comprimida A_c capaz de transmitir cortante por rozamiento ($N_c = \sigma_c \cdot A_c$). No toda el área que se encuentra comprimida es capaz de transmitir cortante. El cortante se transmite sólo por las almas a través de su parte comprimida para algunos autores [BREEN, 1993] y también a través de la parte del forjado próximo a las almas para otros [ATEP, 1996] (figura 2.6).
- c. La contribución de las llaves a la resistencia de cortante.

La formulación actual predice valores de la resistencia a cortante que varían en proporción aproximada de 1.5 a 1 [BREEN, 1993, APARICIO, 1998], como queda reflejado en la figura 2.7, extraída de BREEN 1993.

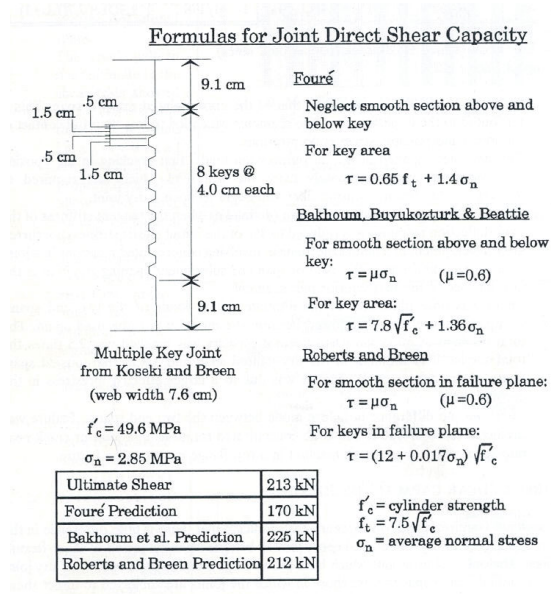


Figura 2.7. Valores del cortante último según varios autores

Es práctica común controlar la proporción de la zona comprimida en las secciones con juntas abiertas, de manera que permanezca comprimido al menos dos tercios del canto en secciones con momentos negativos [HUANG, 1993]. En alguna norma, esta limitación se impone a toda la estructura [EUROCÓDIGO 2, 1996].

2.1.4.3 Cálculo y dimensionamiento.

El comportamiento en prerrotura de las estructuras con pretensado exterior es claramente no lineal, siendo en general un modelo de análisis lineal insuficiente para estudiar y dimensionarlas. Además, la deformabilidad de este tipo de dovelas y pretensado exterior no pueden ser evaluados con métodos convencionales de análisis no lineal [VIRLOGEUX, 1993^b].

En ATEP 1996 se proponen tres métodos para calcular estas estructuras, que se exponen a continuación en orden de complejidad creciente:

- Cálculo lineal y elástico de esfuerzos, extrayendo los incrementos de tensión del acero en rotura de APARICIO 1993, siendo éstos función de la esbeltez y de las condiciones de apoyo.
- Cálculo plástico, deduciendo los incrementos de tensión de la armadura a partir de la flecha plástica de la estructura.
- Análisis no lineal de la estructura con programas de cálculo adecuados. Entre éstos cabe destacar aquel cuya formulación queda recogida en Ramos (1994), por el grado de precisión que logra en el análisis.

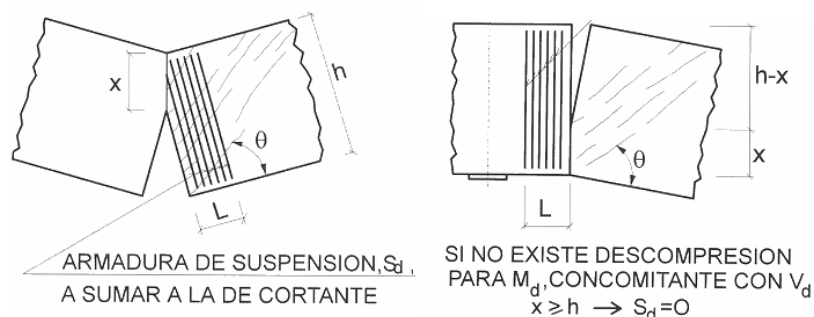


Figura 2.8. Bielas de cortante con flexión positiva (izquierda). Bielas de cortante con flexión negativa (derecha). [VIRLOGEUX, 1993^a]

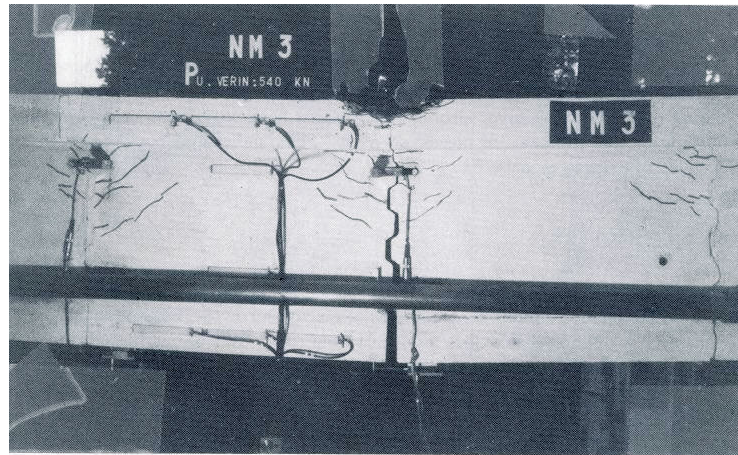


Figura 2.9. Fisuras de cortante previas a la rotura
[FOURE, 1993]

En el dimensionamiento de juntas no encoladas se minorará la resistencia a compresión del hormigón en un 15%, para reflejar el posible contacto irregular de las caras entre dos dovelas unidas a hueso [ATEP, 1996].

De la resistencia a cortante de la junta ya se ha tratado con profusión en el apartado anterior, si bien es necesario hacer dos puntualizaciones. En primer lugar, el hecho de que las vainas se encuentren dispuestas fuera del alma permite el dimensionamiento de éstas estrictamente por cortante. En puentes con pretensado interno, el ancho de las almas queda definido por condicionamientos geométricos de recubrimiento de las vainas y no por resistencia. En segundo lugar, y en cuanto al armado transversal de la propia dovela entre juntas abiertas se refiere, se recomienda colocar una armadura de suspensión que ayude a colgar las bielas de cortante [VIRLOGEUX, 1993^c; ATEP, 1996]. Gráficamente esta armadura de suspensión se ve justificada en la figura 2.8. Sin embargo, ningún estudio teórico ni experimental avala la necesidad de esta armadura. Es más, tanto los ensayos efectuados en la UPC [GÓMEZ, 1995; ANLLO, 1996], como los realizados en Saint-Rémy-lès-Chevreuse [FOURE, 1993], parecen reflejar un mapa de fisuras de cortante (figura 2.9) distintas a las dibujadas en la figura 2.8.

2.2 Refuerzo de Estructuras de Hormigón

En este apartado se presenta una introducción sobre el refuerzo de estructuras de hormigón, describiéndose las diversas técnicas de refuerzo y rehabilitación de

estructuras existentes, así como la importancia de los materiales compuestos y su utilización como refuerzo en varios países. Posteriormente, se enfatizará el refuerzo a partir de estructuras externas adheridas al hormigón, mostrando las diversas aplicaciones tanto con materiales metálicos como con materiales compuestos, en específico FRP.

2.2.1 Introducción

Dentro del campo de la ingeniería civil, una construcción debe ofrecer una buena funcionalidad a sus usuarios durante la vida útil del proyecto. Debido a que la vida útil de las construcciones de hormigón es generalmente larga, los requerimientos sobre la estructura pueden verse afectados por diversos factores reduciendo o acabando con la vida útil debido a las condiciones de utilización y seguridad [JUVANDES, 1999].

Dentro de una obra civil pueden surgir situaciones en donde es necesario aumentar la capacidad portante de una estructura de hormigón armado en determinado momento de su existencia, debido a diversos factores como puede ser: un cambio de uso; modificación en las normativas de construcción; deficiencias durante la fase del proyecto de construcción; aumento en la magnitud de las acciones a las que está sometida la estructura; la modificación o eliminación de elementos estructurales; entre otras. Existen además otro tipo de condicionantes en las que la necesidad de realizar una reparación y rehabilitación estructural se hace necesaria debido a la degradación de los materiales de construcción, ya sea debido al tiempo, a la aparición de ciertas patologías o por acciones accidentales. Todos estos factores conducirán a llevar a cabo una evaluación sobre la forma de actuar más adecuada, presentándose como alternativa el refuerzo de la estructura por adhesión de estructuras externas, ya sean metálicas o constituidas por materiales compuestos.

Dentro de las soluciones para el refuerzo de estructuras de hormigón por medio de elementos metálicos externos se encuentran las siguientes:

- a. Recrecidos de hormigón: Se refiere a cuando una nueva capa de hormigón armado se coloca sobre una armadura existente con el objeto de rigidizar o reparar la estructura. Esta capa se coloca como un hormigonado normal o se

- proyecta. Su misión es aumentar en elementos flexionados la capacidad a compresión o tracción en función de cual sea su localización [HILTI, 2002].
- b. Refuerzo pasivo: Se refiere a cuando se utilizan perfiles metálicos, chapas metálicas o elementos prefabricados adheridos o anclados a la superficie del hormigón [MONTEIRO et al., 1996].
 - c. Refuerzo activo: Se refiere a la utilización de armaduras postesas utilizando la técnica del pretensado exterior descrita anteriormente [APARICIO et al., 1993].

Debido a que estos tipos de soluciones estructurales presentan en algunas situaciones dificultades técnicas, como la fijación al hormigón y la necesidad de sistemas adicionales para evitar la corrosión, a partir de la última década ha surgido un interés especial en la búsqueda de materiales con características apropiadas para los proyectos de ingeniería actuales, en donde es necesaria la aplicación de materiales muy resistentes, que sean durables y resistentes a la corrosión, poco deformables y capaces de absorber y disipar energía evitando la rotura frágil [BRITO, 1986]. Los materiales compuestos representan un gran avance dentro de este contexto, debido al esfuerzo permanente de lograr la optimización de los materiales estructurales [TALY, 1998].

Desde 1940, los materiales compuestos se han utilizado para desempeñar funciones estructurales importantes en el campo de la ingeniería militar, aeroespacial, náutica, ferroviaria y automovilística, y debido al desempeño que han tenido, se han tratado de implementar en otros campos, como es el caso de la construcción civil, en donde se han aplicado eficientemente como medios de reparación y refuerzo de estructuras a nivel mundial, principalmente utilizando “*Fiber Reinforced Plastics*” (FRP). Muchos investigadores y organizaciones se han dedicado a trabajar en la integración de las aplicaciones de estos nuevos materiales en el campo de la ingeniería civil, destacando entre estos tres frentes de investigación: Japón enfocado a la prefabricación, al pretensado y al refuerzo contra sismo; en América del Norte en donde se trabaja respecto a la durabilidad de las construcciones y por último en Europa, en donde se ha encaminado el trabajo a temas relacionados con la rehabilitación de la infraestructura y del patrimonio histórico. En la actualidad la utilización de materiales compuestos en el campo de la ingeniería civil es reducida si tomamos en cuenta el uso de este tipo de materiales dentro de la industria aeroespacial, automovilística, ferroviaria y naval. En un principio, estas industrias limitaban la aplicación de estos productos a elementos

estructurales secundarios en combinación de otros materiales como el acero, el aluminio o la madera. Actualmente, la confianza para utilizarlos se ha incrementado debido a su comportamiento y a sus propiedades ventajosas sobre otros materiales, originando que sus aplicaciones se extiendan a elementos estructurales principales para la construcción de aviones, barcos, naves espaciales, entre otros.

En el terreno de la construcción, el uso de “*Fiber Reinforced Plastics*” (FRP) ha tenido desde su aparición, una atención especial debido a su eficiente comportamiento bajo esfuerzos de tracción, su bajo peso específico, su gran resistencia frente a agentes externos y a la sencillez de su puesta en obra entre otras características ventajosas. Estas características han conducido a que estos materiales se hayan intentado implementar como medios de reparación y refuerzo de estructuras de hormigón como armaduras no metálicas.

Los productos de FRP son anisótropos y prácticamente su composición determina la capacidad resistente del sistema. No presentan rama plástica en el diagrama esfuerzo-deformación, por lo que se consideran materiales perfectamente elásticos hasta la rotura [IYER ET AL., 1991; NANNI, 1993; ACI 440R-96, 1996; EUROCOMP, 1996].

La necesidad de la rehabilitación de la infraestructura de la mayoría de los países es uno de los factores imperativos que ha llevado a que esta línea de investigación se haya desarrollado en la última década, así por ejemplo, en EUA será necesario sustituir un número importante de tableros de puentes deteriorados (250,000 a 578,000 existentes), por otro lado en el Reino Unido, los costos de reparación de unos 165,000 puentes entre 1988 y 1999 se estimaron en unos 1,250 millones de libras [WEAVER, 1995]. Por esto, es posible encontrar una variedad de productos comerciales basados en materiales compuestos FRP en la industria de la construcción, siendo los más relevantes en Europa, los tendones de ARAPREE (Alemania), los laminados unidireccionales de fibra de carbono tipo CARBODUR y CFK (Suiza), los tendones tipo PARAFIL (Reino Unido), las varillas tipo POLYSTAL (Alemania), las varillas tipo SPIFLEX, los tendones JONC J. T. y el tejido TFC (Francia). Otros países como EUA, Canadá o Japón son también potenciales fuentes de investigación al tener experiencia en el dominio de los materiales compuestos [JUVANDES, 1999].

A partir de la década de los 90s, la investigación experimental en relación al comportamiento estructural de los “*Fiber Reinforced Plastics*” (FRP) como refuerzo en estructuras de hormigón, ha tenido un avance significativo debido a los resultados obtenidos tanto en estado límite de servicio ELS, como en el estado límite último ELU de las estructuras de hormigón armado, aunque han aparecido algunos modos de falla frágiles en vigas reforzadas a flexión, debido al despegue de las láminas de FRP [entre otros OEHLERS & MORAN, 1990; SAADATMANESH & EHSANI, 1991; ARDUINI et al., 1997; ZARNIC et al., 1999].

En el laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC se han realizado pruebas de caracterización y comportamiento sobre fibras de aramida y fibras de carbono [LANDA, 2002], proporcionadas por las empresas CTT-Stronghold y Freyssinet respectivamente. Estos ensayos comprenden pruebas con modelos reducidos y a nivel estructural.

En los ensayos realizados se ha observado el comportamiento de los materiales anteriormente mencionados, y se han comparado los resultados obtenidos en el laboratorio con los datos proporcionados por los fabricantes. También se han realizado comparaciones entre la capacidad portante a flexión de las estructuras en estado original y tras la correspondiente reparación en estructuras monolíticas (SALAVERRÍA et al., 1997; SALAVERRÍA et al., 1997^a; SALAVERRÍA et al. 1998; SALAVERRÍA et al., 1999; SALAVERRÍA et al., 2002; LANDA 2002).

Tanto los criterios de diseño como los procedimientos de construcción de refuerzos basados en FRP son en la actualidad imprecisos y dispersos, debido a factores como la novedad del sistema y la diversidad de productos en el mercado, la multiplicidad en los campos de aplicación y la divergencia de opiniones en cuanto a sus objetivos. No obstante, algunos países han publicado recomendaciones basadas en trabajos de investigación exhaustivos para buscar la uniformidad de criterios de aplicación, tanto en proyecto como en construcción, de los sistemas FRP comerciales utilizados como refuerzo en ese país.

Entre 1996 y 1998 se generalizó en Japón el término “*Continuous Fiber Sheets*” para designar a los productos comerciales usados para la construcción civil que contenían

fibras continuas como tejidos y tendones, pre-impregnados “*prepregs*” con una resina superficial [JSCE, 1997; JCI TC952, 1998]. La clasificación del refuerzo por adherencia de FRP según el “*Japan Concrete Institute*” (JCI), se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación del refuerzo según el “*Japan Concrete Institute*” [JCI TC952, 1998]

Técnica de reparación	Objetivo del refuerzo	Áreas de investigación
Refuerzo por adherencia	1	Flexión Pilares (puentes, edificios), vigas (puentes), vigas, forjados, chimeneas
	2	Cortante Pilares (puentes, edificios), vigas (puentes), vigas, forjados, chimeneas
	3	Compresión Pilares (puentes, edificios)
	4	Prevención del deterioro Chimeneas, túneles, postes

En los EUA el comité de trabajo del “*American Concrete Institute*” (ACI) designado como “*ACI Committee 440*” es el encargado de la dinamización y de las actividades relacionadas con los sistemas materiales compuestos de FRP aplicados a la construcción con hormigón. De la experiencia resumida en una publicación del subgrupo denominado “*Subcommittee 440C*” [ACI 440R-96, 1996], pueden definirse dos grupos principales en relación al refuerzo por adherencia de FRP: en vigas de hormigón y en confinamientos. A finales de 1999 el “*Subcomité 440F*” [ACI 440F, 1999] generaliza la clasificación anterior y adopta tres campos principales de aplicación, atribuyendo un término específico a cada uno que se describen a continuación.

- a. *Rehabilitación*: Relacionado a aquellas situaciones de recuperación de la resistencia de la estructura en aquellos sitios en donde se encuentra comprometida su seguridad, debido a la degradación continua de sus elementos.

- b. *Refuerzo*: Atribuida al refuerzo estructural de elementos para la corrección de anomalías originadas por deficiencias de proyecto y de la capacidad portante por un aumento en las acciones de diseño o por un cambio de uso.
- c. *Sísmico*: Representa aquellas situaciones de aumento a la resistencia a acciones sísmicas, por medio de la ductilidad y de la resistencia a corte de los elementos estructurales, permitiendo de este modo la disipación de la energía y un aumento en la capacidad de deformación para las acciones establecidas en el reglamento.

De cualquier forma, cualquiera de los casos de refuerzo descritos anteriormente, deberán adecuarse a la necesidad específica de aumentar la resistencia a flexión, cortante, tracción, compresión o aumentar la ductilidad del elemento estructural.

En Europa, a finales de 1996, se formó el grupo “*fib TG9.3*”, con el fin de realizar las siguientes tareas:

- a. Elaborar una guía de diseño de acuerdo con el formato del código modelo “*CIB-FIP*” y el Eurocódigo 2, a partir de redacciones existentes de otros códigos, reportes de estados del arte, artículos técnicos e información recopilada de trabajos de investigación.
- b. Estandarizar métodos de ensayos para la caracterización del FRP.
- c. Elaborar una base de datos con los trabajos de investigación y aplicaciones en el campo del refuerzo de estructuras con materiales compuestos avanzados.
- d. Además de elaborar una guía práctica de ejecución de estructuras de hormigón reforzadas con FRP.

En términos generales puede concluirse que a nivel internacional en el campo de la construcción civil los sistemas de refuerzo basados en materiales compuestos FRP del tipo laminado y tejido flexible son los más estudiados para el caso de estructuras de hormigón armado reforzadas exteriormente [JUVANDES, 1999].

2.2.2 Refuerzo con elementos metálicos

Esta técnica surgió en Francia a finales de los años 60, cuando L’Hermite (1967) y Bresson (1971) efectuaron los primeros ensayos sobre vigas de hormigón reforzadas con chapas metálicas. Según Dussek (1974), este tipo de refuerzo se utilizó en Sudáfrica

en 1964. En Francia, se reforzó un puente de hormigón utilizando chapas metálicas a principios de los años 70 [L'HERMITE, 1977]. Simultáneamente, en Inglaterra se comenzó a investigar sobre este tipo de refuerzo para rehabilitar varios puentes como describe Mays et al. (1985). Posteriormente fueron rehabilitadas un sin número de estructuras de hormigón en todo el mundo, incluyendo varios puentes, utilizando la técnica de refuerzo exterior por chapas metálicas adheridas. Todos estos trabajos se basaron esencialmente en el refuerzo a flexión, aunque recientemente se han realizado refuerzos a cortante y compresión como describe Jones et al. (1985). Otras aplicaciones relacionadas a esta área de trabajo se pueden encontrar en el trabajo de investigación realizado por Täljsten (1994).

Paralelamente al campo de aplicación, fueron realizados varios estudios experimentales y analíticos, destacándose dentro de estos, el trabajo realizado por Ladner et al. (1981) sobre un conjunto de ensayos efectuados por el “*Swiss Federal Laboratories Testing and Research*” (EMPA) en donde se analizó la transmisión de esfuerzos por adherencia, así como el comportamiento estático del refuerzo, a fatiga y el comportamiento a largo plazo en las juntas de las chapas. Según Malek (1997), se destacan los trabajos realizados en 1982 por MacDonald y Calder acerca del comportamiento estático de vigas reforzadas; en 1985 Van Gemert y Vanden Bosch con sus ensayos a fatiga y a la exposición climática de vigas reforzadas; en 1987 en el trabajo realizado por Swamy et al., se analizó la importancia de las propiedades mecánicas del hormigón en el refuerzo; en 1990 Hamoush y Ahmed realizaron una interpretación analítica de los modos de fallo y Ziraba et al. (1994) en donde se hacen una propuesta de las recomendaciones para proyecto.

A pesar de que los materiales metálicos son los más divulgados para realizar reparaciones y refuerzo de estructuras de hormigón, presentan algunos inconvenientes significativos que se pueden resumir en tres puntos principales [MEIER, 1977^a; TÄLJSTEN, 1994]:

- a. Las dificultades de montaje “in situ” del sistema, debido al elevado peso de las chapas metálicas aunado a la accesibilidad limitada que se presenta en algunos casos.
- b. El riesgo de corrosión en la superficie del acero en contacto con el adhesivo.

- c. La necesidad de crear juntas en las chapas debido a la limitación en las dimensiones para su transporte.

2.2.3 Refuerzo con elementos no metálicos

Debido a los factores mencionados anteriormente, se concluye que los materiales tradicionales pueden resultar inadecuados en determinadas situaciones, por lo que se debe buscar alguna solución alternativa [JUVANDES, 1999].

A partir de la segunda mitad del siglo pasado, los materiales compuestos se han implementado en la industria de la construcción, aumentando significativamente en importancia en relación con los metales. La importancia de los materiales compuestos no ha crecido de manera lineal, debido a que en el periodo comprendido durante la segunda guerra mundial la importancia de los metales creció significativamente por razones obvias, sin embargo después de este periodo se ha visto como cada vez los nuevos materiales como los poliméricos y los cerámicos van desplazando a los metálicos.

Los primeros ensayos de estructuras reforzadas con FRP adheridas exteriormente, se llevaron a cabo en 1984 en centros dedicados a la investigación como el “*Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*” (EMPA) en Suiza, “*Federal Institute for Materials Testing*” (MPA) y el “*Institute for Building Materials, Concrete Construction and Fire Protection*” (iBMB-Technische Universität Braunschweig) en Alemania. A continuación, el potencial de estos materiales fue confirmado en centros como el “*Massachusetts Institute of Technology*” (MIT) en los EUA y algunos otros en Canadá y Japón. Las armaduras fabricadas a partir de materiales compuestos surgieron en Europa con la forma de laminados prefabricados de FRP, en Japón y EUA en forma de mantas y tejidos los cuales adquirirían la consistencia de FRP al polimerizarse la resina que se utilizaba para el pegado en el hormigón.

Según Meier (1997^a), la primera aplicación de un sistema de refuerzo con FRP sucedió en Europa, en el puente “*Kattenbush Bridge*” (Alemania) entre 1986 y 1987, donde se utilizaron 20 tiras de un laminado polimérico reforzado con fibras de vidrio (GFRP), y desde 1991 aproximadamente 250 estructuras de medio a gran tamaño fueron reforzadas en Suiza con laminados de CFRP, correspondiendo a cerca de 17,000Kg de material

compuesto, sustituyendo a un equivalente de 510,000Kg de acero. Otro ejemplo es el puente “*Ibach Bridge*” (Suiza), en el cual se utilizó por primera vez un refuerzo constituido por un laminado polimérico con fibras de carbono (CFRP) [JUVANDES et al., 1996^a].

En Alemania y Suiza, la publicación de los dos primeros documentos de homologación de construcción y de recomendaciones de proyecto de sistemas laminados de CFRP [D0128, 1995; ROSTASY, 1997^a; ROSTASY, 1998; D0144, 1997; Z-36.12-29, 1997; Z-36.12-54, 1998], aumentó la confianza a nivel de producción, proyecto y aplicación. Consecutivamente, el campo de aplicación de los laminados se extendió a la rehabilitación de edificios de carácter histórico en Grecia [TRIANTAFILLOU, et al., 1993; TRIANTAFILLOU, 1996] y el refuerzo contra sismo de paredes de obra de fábrica, muros y forjados en Italia [SPENA et al., 1995]. La experiencia de varios países de Europa se describe en varias comunicaciones de conferencias editadas por Taerwe [FRPRCS-2, 1995] y en algunos artículos más recientes [MEIER, 1997^b; TAERWE, 1997; SEIBLE, 1998].

En Japón los sistemas de refuerzo de FRP se desarrollaron a finales de los años 80, y fue aplicado por primera vez en 1992 en el proceso de refuerzo y confinamiento de elementos en un puente en Tokio [MEIER, 1997^a]. Después, los sistemas de refuerzo de FRP, continuos y unidireccionales en forma de manta o multidireccionales en forma de tejidos, se utilizaron para refuerzo a sismo, y a flexión y cortante a través del confinamiento parcial o total de pilares, paredes y vigas de edificios y puentes de hormigón armado y pretensado. La reconstrucción de la ciudad de Kobe, después de haber sido devastada por el sismo de Hanshin en Enero de 1995, es un ejemplo de la importancia de este tipo de materiales en la reparación y refuerzo estructural. Este caso, como muchos otros, se describen con detalles en la publicación de 1998 del “*Japan Concrete Institute*” (JCI), que trata sobre la experiencia de este país en el área de refuerzo de elementos de hormigón con sistemas continuos de FRP [JCI TC952, 1998].

Paralelamente, en los EUA y Canadá se ha invertido en la exploración de beneficios resultantes de la rehabilitación de estructuras de hormigón con sistemas de refuerzo basados en FRP. El sistema CALTRANS de refuerzo exterior de pilares por encamisado con mantas de fibra de vidrio se incrementó en las zonas sísmicas. Entre 1993 y 1994,

en las ciudades de Los Angeles y Santa Mónica, esta técnica se aplicó a 200 pilares aproximadamente [ACI 440R-96, 1996]. Priestley et al. (1992) se refiere en una de sus publicaciones a otras situaciones de revestimiento exterior de pilares de puentes y edificios, para aumentar su capacidad a cortante en casos de refuerzo a sismo. Los dos primeros ejemplos de rehabilitación de un puente en los EUA con mantas de CFRP fueron llevados a cabo en 1994 por Chajes et al. (1993). En 1998 Nanni [ICCI'98, 1998] aplicó el sistema MBrace utilizando mantas de CFRP como refuerzo en puentes.

En noviembre de 2001 en la ciudad de Portugal se llevó a cabo el congreso “*CCC2001 Composites in Constructions*”, en donde se expuso una variedad de artículos relacionados con temas afines a la combinación de los materiales compuestos avanzados y los materiales tradicionales de construcción [CCC2001, 2001].

En la Universidad Politécnica de Cataluña se han realizado desde 1997 varios trabajos de investigación relacionados con el refuerzo de estructuras de hormigón con diferentes tipos de FRP, entre los que destacan:

- a. En 1997 [SALAVARRIA, 2002], se llevó a cabo el refuerzo de vigas hiperestáticas con fibras aramidadas (AFRP) y con tejidos de fibras de carbono (CFRP), comparándose la resistencia de la estructura en estado original y tras el refuerzo con FRP.
- b. En 2001 [LANDA, 2002], se realizó una campaña experimental en donde se realizaron ensayos con modelos reducidos reforzados a cortante con fibras aramidadas (AFRP) y tejidos de fibras de carbono (CFRP).
- c. En 2001 [DOS SANTOS, 2002], quien realizó un estudio teórico experimental sobre el fallo por adherencia de las mantas de fibras de carbono (CFRP), utilizando modelos reducidos.
- d. En 2001 [AIRE, 2002], se aplicaron mantas de fibra de vidrio (GFRP) y mantas de fibra de carbono (CFRP), encamisando probetas cilíndricas de hormigón con el fin de evaluar el aumento de resistencia a compresión por confinamiento.

- e. En 2001 [OLLER, 2002], realizó una serie de ensayos con vigas de hormigón armado reforzadas con laminados y mantas de fibras de carbono por el procedimiento MBrace, evaluando la aportación de resistencia a flexión de los materiales compuestos.

Actualmente se están realizando en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (LTE) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) ensayos con modelos reducidos de muros de obra de fábrica reforzados con FRP entre otros.

2.3 Refuerzo a Flexión de Estructuras de Hormigón con Materiales Compuestos de FRP

2.3.1 Introducción

Un material compuesto se define como la unión de dos o más materiales físicamente distintos y separables mecánicamente, en donde la mezcla se hace de tal forma, que la dispersión de un material en el otro pueda hacerse de manera controlada para alcanzar unas propiedades óptimas, obteniendo como resultado un nuevo material con propiedades superiores, y posiblemente únicas en algún aspecto específico, en comparación con los componentes originales por separado.

Los materiales compuestos se han clasificado de muchas maneras según las ideas y conceptos necesarios para identificarlos. Una clasificación útil y completa se muestra en la tabla 2.2 con algunos ejemplos. La mayoría de los materiales que aparecen en la naturaleza obtienen sus magníficas propiedades de la combinación de dos o más componentes. Así, por ejemplo, muchos tejidos del cuerpo, que tienen una alta resistencia combinada con una enorme flexibilidad, están hechos de fibras resistentes tales como el colágeno, embebidas en una matriz de rigidez inferior. Las fibras se alinean de tal manera que proporcionen una rigidez máxima en la dirección de mayores cargas siendo capaces de deslizarse unas sobre otras para que el tejido sea flexible. De manera similar, cuando se observa la madera bajo el microscopio es posible distinguir su estructura fibrilar. No es sorprendente que el bambú haya sido llamado como “*la fibra de vidrio*” de la naturaleza [HULL, 1981].

La palabra “*composites*” se refiere usualmente a refuerzos con fibra de materiales metálicos, poliméricos y cerámicos, que fueron desarrollados inicialmente para la industria aeroespacial en la década de los 50s.

Tabla 2.2. Clasificación de los materiales compuestos [HULL, 1981]

Tipos	Ejemplos
Materiales compuestos naturales	Madera Hueso Bambú Músculos y otros tejidos
Materiales microcompuestos	Aleaciones metálicas: Ej. Aceros Termoplásticos endurecidos: Ej. Poliestireno de impacto ABS. Hojas para moldeo continuo (SMC) Termoplásticos reforzados
Macrocomposites	Acero galvanizado Vigas de hormigón armado Palas de helicópteros Esquis

Aunque los materiales compuestos son productos de alta tecnología para algunos, estos toman sus características de organismos vivos, como las microestructuras de la madera, las telarañas y caparazones de moluscos. Un árbol es un buen ejemplo de un material compuesto natural (Figura. 2.10), siendo la celulosa el material fibroso y la lignina un

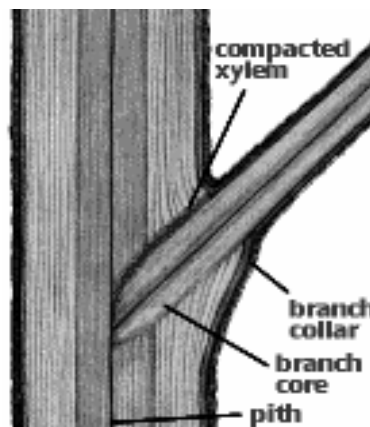


Figura 2.10. Material compuesto natural [ECT, 2000]

polímero natural, formando así, las paredes celulares de la madera, reforzando el material entre ellos.

Las fibras y matrices de materiales compuestos avanzados pueden ser combinadas usando una variedad de procesos de fabricación, según su destino. Así pues se selecciona la orientación de las fibras, el número y tamaño de filamentos y la complejidad de las fibras entre otras cosas.

Posiblemente el mejor uso conocido se encuentra en la industria aeroespacial, aunque extienden su campo de aplicación a la industria automotriz, biomédica, y a la fabricación de artículos deportivos. Por otro lado sus características mecánicas, químicas y físicas han hecho que se utilicen dentro de la industria de la construcción como medios de rehabilitación, reparación y refuerzo de estructuras.

2.3.2 Propiedades de los materiales compuestos

Las propiedades de los materiales compuestos dependen del tipo de materiales de los cuales están fabricados. A continuación se hará referencia a las características de las fibras y las resinas utilizadas y, posteriormente, a los FRP. Todo lo que se describe a continuación se enfocará a tres tipos de fibras usadas habitualmente en la ingeniería civil; fibra de carbono, fibra de vidrio y fibra aramida.

2.3.2.1 Propiedades de las fibras

Existen varios grados de fibras de carbono (o fibras de vidrio o fibras de aramida), la tabla 2.3 muestra varios tipos de fibras con sus propiedades típicas.

Hay varias observaciones que deben realizarse en la tabla 2.3. Las fibras de carbono tienen el módulo de elasticidad más elevado, pero tanto las fibras de vidrio como las fibras de aramida tienen una resistencia a tracción mayor. La resistencia a tracción mayor de las fibras de vidrio y fibras de aramida (comparadas con las de carbono), no se traduce en una resistencia mayor del material compuesto, ya que las fibras de vidrio son muy sensibles a pequeños defectos, los cuales pueden reducir importantemente su resistencia. Las fibras de carbono tienen una deformación a rotura muy baja, por esto no deben usarse en aplicaciones en las que se requiere una ductilidad importante (ej.

refuerzo sísmico). Tanto la rigidez como la resistencia a compresión son muy difíciles de estimar en las fibras, ya que son muy difíciles de ensayar experimentalmente.

Es imposible obtener una conclusión a partir de la tabla 2.3 de cual de los tres tipos de fibras es estructuralmente más eficiente, debido a que esto dependerá de las condiciones de entorno, además el peso del material compuesto dependerá de la concentración de fibras en la matriz.

Tabla 2.3. Valores típicos de las propiedades de las fibras [ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK, 1987; ENGINEERS GUIDE TO COMPOSITE MATERIALS, 1987].

Tipo de fibra	Módulo de elasticidad a tracción, GPa	Resistencia a tracción, MPa	Deformación axial máxima en rotura, %	Densidad, g/cm ³
Carbono (módulo bajo)	170	1380	0.90	1.90
Carbono (módulo alto)	380	1720	0.40	2.00
Carbono (módulo muy alto)	760	2210	0.30	2.15
Vidrio (E-glass)	81	3450	4.88	2.60
Vidrio (S-glass)	89	4590	5.70	2.48
Aramida (alta tenacidad)	83	3620	4.00	1.44
Aramida (módulo alto)	131	3620-4140	2.80	1.44
Aramida (módulo muy alto)	186	3450	2.00	1.47

2.3.2.2 Propiedades de la resina

Las propiedades de las resinas dependen de su estructura interna, a continuación se muestra en la tabla 2.4 las propiedades de algunas resinas típicas.

Como se puede observar comparando las tablas 2.3 y 2.4, la mayoría de las resinas contribuyen muy poco a la capacidad de carga de los materiales compuestos, De cualquier forma, las resinas pueden tener gran importancia en la tenacidad de los materiales compuestos, mientras más dúctil sea la resina la tenacidad del laminado aumentará. La función de la resina es transferir la carga de una fibra a otra adyacente, por lo que cuando una fibra rompe, una resina dúctil distribuye mejor la fuerza a varias fibras y no sólo a la fibra adyacente. Esto quiere decir que el laminado resistirá más fibras rotas, aumentando la tenacidad del material compuesto.

Tabla 2.4. Propiedades típicas de las resinas [ENGINEERED MATERIALS HANDBOOK, 1987; ENGINEERS GUIDE TO COMPOSITE MATERIALS, 1987].

Tipo de resina	Resistencia a tracción, MPa	Módulo de elasticidad a tracción, GPa	Deformación, %
Epóxicas	103-172	4.83-6.21	< 2.0
Polyimide	48-83	2.76-5.52	1.73-3.2
Poliéster	21-83	2.76-4.14	1.4-4.0
Termoplásticos	76-103	2.21-4.83	5-10

2.3.2.3 Propiedades del laminado

a. *Resistencia.* Para una combinación de fibras y resina dadas, existen dos parámetros adicionales que afectan significativamente la resistencia del material compuesto. Estos parámetros son el porcentaje del volumen de fibras y la orientación de las fibras. El porcentaje volumétrico de fibras, es el porcentaje del volumen del material compuesto que es ocupado por las fibras. La tabla 2.5 muestra las propiedades de un laminado unidireccional. La tabla 2.6 muestra las propiedades de un laminado multidireccional. Estos son los datos que se usan para los diseños actuales, en lugar de la combinación de los valores de las tablas 2.3 y 2.4.

(iv) *Resistencia a tracción.* En la tabla 2.5 longitudinal se refiere a la resistencia en la dirección de la fibra y transversal se refiere a la resistencia en la dirección perpendicular a la fibra. La resistencia longitudinal a tracción es de 30 a 40 veces mayor que la resistencia transversal a tracción, debido a que en el sentido

transversal el material compuesto puede fallar sin presentar rotura de fibras. Su resistencia en esta dirección se determina principalmente por la resistencia aportada por la resina. La resistencia longitudinal a tracción de un material compuesto unidireccional puede aproximarse frecuentemente a partir de la regla de mezclas utilizando la fórmula:

$$TS_c = TS_f V_f + TS_m V_m \quad (2.2)$$

donde,

TS_c = resistencia última a tracción del material compuesto

TS_f = resistencia última a tracción de las fibras

V_f = porcentaje volumétrico de fibras

TS_m = resistencia última a tracción de la resina

V_m = porcentaje volumétrico de resina

Tabla 2.5. Resistencia típica en laminados unidireccionales [TSAI & HAHN, 1980; DELAWARE COMPOSITES DESIGN ENCYCLOPEDIA, 1990]

Material	Resistencia longitudinal		Resistencia transversal		
	Tracción, MPa	Compresión, MPa	Tracción, MPa	Compresión, MPa	Cortante, MPa
Carbono/Epoxi	1448	600	52	206	93
Vidrio/Vinilo	610	215	49	49	16
Aramida/Epoxi	1400	235	12	53	34

(v) *Resistencia a compresión.* Se puede observar que la resistencia a compresión transversal es mayor que la resistencia a tracción transversal para un sistema unidireccional. La resina por si sola es más resistente a compresión que a tracción, además, las fibras pueden suministrar resistencia significativa a cargas transversales de tracción. La resistencia a compresión transversal es también típicamente menor que la resistencia longitudinal a compresión.

Los materiales compuestos basados en fibras de aramida tienen una resistencia a compresión mucho menor que la resistencia a tracción, debido a que las fibras en la aramida tienen una estructura parecida a una cuerda y está compuesta por fibras mucho más pequeñas originando como consecuencia una resistencia longitudinal a compresión muy baja.

(vi) *Efecto de la orientación de las fibras.* La mayoría de los laminados no son unidireccionales sino que tienen una variedad de orientaciones en las fibras. Para ilustrar como afecta a los materiales compuestos, se presentan en la tabla 2.6 las resistencias calculadas para un laminado Vidrio/Poliéster con varias orientaciones. La notación utilizada para el tipo de fibra es $[\theta_n / \theta_n / \dots]_s$, donde θ es la orientación de las fibras, n es el número de capas con esa orientación y la letra s fuera de los corchetes indica que se repiten las capas simétricamente. Por ejemplo, un laminado de 16 capas que tiene la mitad de las fibras en una dirección y mitad de ellas en una dirección perpendicular se podría representar como:

$$[0_4/90_8/0_4]$$

Debido a que este laminado es simétrico, se puede utilizar una notación alterna que se muestra a continuación (donde la s indica que el eje de simetría es la última capa mostrada en el listado):

$$[0_4/90_4]_s$$

El primer laminado de la tabla 2.6 es unidireccional, por lo que la resistencia será la máxima posible in una dirección, pero en la dirección transversal tendrá la resistencia mínima, lo que podría ocasionar la falla prematura en caso de que alguna carga sea aplicada fuera del eje longitudinal del laminado. Hay que observar el incremento en la resistencia del laminado con orientaciones de fibras a $+45^\circ$ y -45° , comparado con el que tiene solamente fibras orientadas a $+45^\circ$. Esto se presenta debido a que el laminado que tiene solamente fibras orientadas a $+45^\circ$ puede fallar a lo largo de la dirección de las fibras sin haberse roto ninguna. Por el contrario, en el que se presentan las dos orientaciones puede ser que rompan algunas fibras sin llegar a la rotura del laminado.

En la actualidad las disposiciones de fibras utilizadas en los laminados son muy similares a los cuatro últimos que se muestran en la tabla 2.6. Tradicionalmente los diseñadores han usado disposiciones de fibras en donde existe el mismo número de capas a 0° , 45° , -45° y 90° , obteniendo un laminado que tiene una resistencia de una vez y media comparado con la capa orientada a 0° que lo compone. De cualquier forma, estas configuraciones tienen resistencias menores que los laminados unidireccionales. Hay que observar que la resistencia en el eje longitudinal aumenta cuando se incrementan las capas colocadas a 0° , aunque este aumento no es proporcional.

Tabla 2.6. Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a tracción de un laminado Vidrio/Poliéster [ETL 1110-2-548, 1997]

Tipo de laminado según ETL 1110-2-548 (1997)	Resistencia típica en dirección 0° , MPa	Resistencia típica en dirección 90° , MPa
$[0_8]$	610	49
$[45_8]$	98.8	98.8
$[45_2/-45_2]_s$	120	120
$[0_2/90_2]_s$	453	453
$[0/90/45/-45]_s$	287	287
$[0_4/90_4/45/-45]_s$	393	393
$[0_6/90_2/45/-45]_s$	456	123
$[0_8/45/-45]_s$	539	206

(vii) *Resistencia a flexión.* La resistencia a flexión está relacionada tanto con la capacidad portante a tracción como a compresión del material compuesto. Esto es debido a que al flexionar el material compuesto parte estará sometida a esfuerzos de compresión. Durante la carga a flexión los esfuerzos de tracción se originan a partir de la flexión del miembro reforzado en lugar de una carga a tracción directa. Aunque los niveles de resistencia a flexión y a tracción quizá sean los mismos, los mecanismos de falla pueden ser muy diferentes.

La mayoría de los materiales compuestos son anisótropos, pudiendo jugar un papel significativo si existen momentos flectores aplicados a la estructura. Si las capas con menor resistencia de acuerdo a su orientación se encuentran en la cara exterior de la estructura (donde los se localizan las tensiones máximas en flexión), entonces es posible que se produzca la rotura del laminado con niveles bajos de carga. Por el contrario, si las capas con mayor resistencia de acuerdo a su orientación se localizan en la cara exterior de la estructura, entonces éstos desarrollarán gran resistencia a flexión. En resumen, la resistencia a flexión varía según el orden de las capas que conforman el laminado, lo que no ocurre con la tracción directa.

(viii) *Resistencia a cortante.* Como se muestra en la tabla 2.5 la resistencia a cortante de un laminado unidireccional es muy baja. Esto se debe a que las fibras no pueden resistir la deformación en la dirección del cortante máximo. De cualquier modo, la resistencia a cortante puede incrementarse significativamente si hay algunas capas en donde las fibras están orientadas a $\pm 45^\circ$ con respecto a la carga aplicada. Si todas las fibras están orientadas a $\pm 45^\circ$, entonces el laminado desarrollará su resistencia máxima a cortante, sin embargo, la resistencia a tracción será baja. En resumen, si la resistencia a tracción es prioritaria, entonces se deben colocar algunas capas a $\pm 45^\circ$ para incrementar la resistencia a cortante.

- b. *Resistencia específica.* La resistencia específica es una medida que muestra la habilidad de un material para sostener una carga conocida teniendo una masa dada, a diferencia de la resistencia que es la medida que muestra la habilidad para resistir una carga conocida un área dada. Los valores de la resistencia específica varían con el contenido de fibras y la orientación de éstas del mismo modo que lo hace la resistencia. Si la capacidad de carga de una estructura es el parámetro a controlar, los materiales compuestos con mayor resistencia específica serán los más ligeros. Puesto que la resistencia específica considera la capacidad de carga de una masa conocida de un material, el laminado más ligero posiblemente no sea el de sección transversal menor.
- c. *Capacidad de deformación.* La capacidad de deformación de los polímeros reforzados con fibras normalmente es baja. En la tabla 2.3 se muestra la capacidad

de deformación para un número determinado de fibras. La capacidad de deformación es la deformación a rotura medida en el ensayo a tracción. Por tanto, las fibras de carbono tienen una ductilidad muy baja ($< 1\%$). La fibra de vidrio se considera como muy dúctil, en el orden del 4% al 6%. Las fibras aramidas tienen una ductilidad de 2% a 4%. Como se muestra en la tabla 2.6, las resinas epóxicas tienen una ductilidad baja, menores al 1%, las resinas termoplásticas comúnmente usadas en los materiales compuestos pueden tener capacidades de deformación hasta del 10%. En contraste con esto, el acero ASTM A36 tiene un mínimo de ductilidad del 20%. El acero estructural común por consiguiente es mucho más dúctil que las fibras o las resinas en este tipo de FRP.

Cuando las fibras y la resina se juntan, la ductilidad del material compuesto será igual a la media ponderada de la ductilidad de la fibra y la resina. Esto significa que los materiales compuestos frecuentemente tienen una baja ductilidad (del orden del 1% al 5%). Algunos polímeros muy dúctiles pueden proporcionar ductilidades al material compuesto del orden del 10%. Si el material compuesto se elabora en formas complejas, entonces estas formas complejas necesitarán ser moldeadas durante el proceso inicial de fabricación. Una vez que el material compuesto termoendurecido ha sido curado no podrá ser refabricado. Esto se contrapone con la propiedad de muchos metales, los cuales pueden trabajarse en frío para crear formas complejas.

- d. *Módulo de elasticidad o módulo de deformación.* El módulo de elasticidad es significativamente afectado por el tipo de fibras que están involucradas. En la tabla 2.7 se muestran ejemplos de tres tipos de materiales compuestos.

Tabla 2.7. Valores típicos de los módulos de elasticidad de un laminado unidireccional [ETL 1110-2-548, 1997].

Material	Longitudinal GPa	Transversal GPa	Cortante GPa	Coefficiente de Poisson
Carbono/Epoxi	181	10.3	7.17	0.30
Vidrio/Poliéster	54.10	14.05	5.44	0.25
Aramida/Epoxi	75.86	5.45	2.28	0.34

Los materiales compuestos Carbono/Epoxi son intrínsecamente los más rígidos, sin embargo, los materiales compuestos Vidrio/Epoxi tienen una resistencia a cortante superior. Los materiales compuestos basados en aramidas son los más desfavorables frente a cargas transversales al sentido de las fibras.

El porcentaje volumétrico de fibras tiene un efecto significativo sobre el módulo de elasticidad. Para un sistema unidireccional, el módulo puede usualmente ser representado por una sencilla regla a partir de la ecuación de las mezclas.

$$E_L = E_f V_f + E_m V_m \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (2.4)$$

donde,

E_L = Módulo longitudinal del material compuesto (en la dirección de las fibras).

E_f = Módulo de las fibras.

V_f = Porcentaje volumétrico de las fibras.

E_m = Módulo de la matriz.

V_m = Porcentaje volumétrico de la matriz.

E_T = Módulo transversal del material compuesto (perpendicular a la dirección de las fibras).

El ingeniero no debe utilizar las ecuaciones 2.3 y 2.4 para diseño, ya que solamente son aproximaciones, debido a que el módulo también depende del proceso de fabricación.

La orientación de las fibras también juega un papel importante en la rigidez del material compuesto. La figura 2.11 muestra cómo los módulos longitudinales y transversales varían con la orientación. Como se habría previsto, el compuesto es más rígido cuando es cargado en la dirección de las fibras y menos rígido cuando la carga es perpendicular a las fibras.

La figura 2.11 demuestra que la relación entre el módulo y la orientación no es simple, asimismo, el módulo de cortante variará en función de la orientación de la fibra. El módulo de cortante alcanza su valor máximo con una orientación de 45° y un mínimo en 0° o 90° . En la figura 2.12 se muestra un gráfico del módulo de cortante en función de la orientación de las fibras. En muchas aplicaciones se tienen que cumplir requerimientos mínimos tanto para el módulo a tracción como el de cortante, por lo que es común que se utilice una combinación de capas a 0° y 45° .

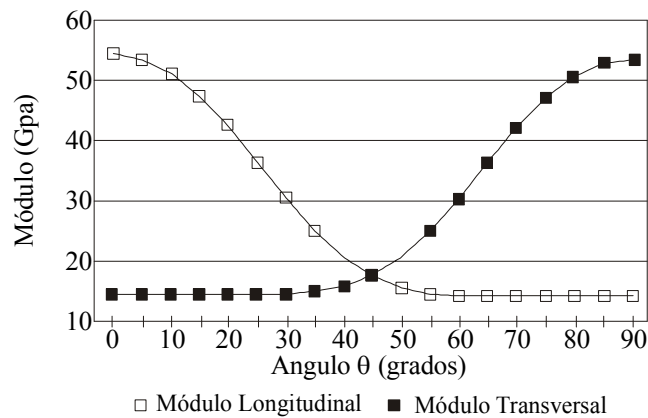


Figura 2.11. Módulos en función de la orientación de las fibras de un compuesto típico de Vidrio/Poliéster con una configuración $[\theta_1/-\theta_2/\theta_1]$, donde θ es el ángulo en grados [ETL 1110-2-548, 1997].

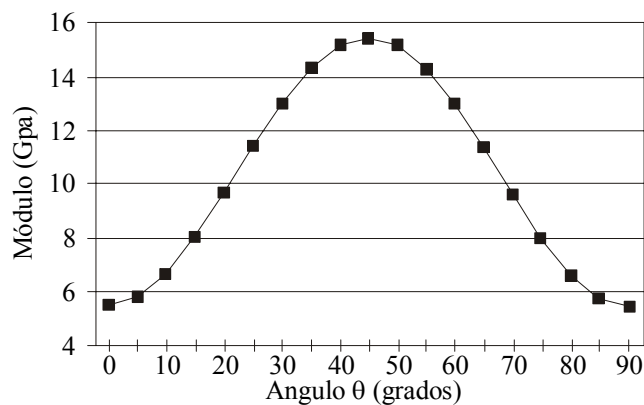


Figura 2.12. Módulo cortante en función de la orientación de las fibras de un compuesto típico de Vidrio/Poliéster con una configuración $[\theta_1/-\theta_2/\theta_1]$, donde θ es el ángulo en grados [ETL 1110-2-548, 1997].

- e. *Módulo específico de elasticidad.* El módulo específico de elasticidad será la medida de la capacidad de los materiales para resistir deformación con una masa dada. En contrapartida el módulo de elasticidad es la medida de la capacidad de un material de resistir deformación con un área dada. El módulo específico de un material es su módulo dividido por su densidad (o la gravedad específica). Los valores del módulo específico variarán de acuerdo al contenido y orientación de las fibras, de manera semejante a como lo hace el módulo de elasticidad. Si el parámetro que rige a una estructura es la rigidez, entonces el material compuesto con el módulo específico más alto será el más ligero.
- f. *Densidad.* La tabla 2.3 muestra los valores de densidades para varios tipos de fibras oscilando entre 1.4 a 2.5g/cm³ aproximadamente. Las densidades de las resinas varían entre 1.3 a 1.8g/cm³ aproximadamente. La densidad del material compuesto se puede calcular con una sencilla regla partiendo de la ecuación de las mezclas

$$\rho_c = \rho_m V_m + \rho_f V_f \quad (2.5)$$

donde,

- ρ_c = Densidad del material compuesto.
 ρ_m = Densidad de la matriz.
 V_m = Porcentaje volumétrico de la matriz.
 ρ_f = Densidad de las fibras.
 V_f = Porcentaje volumétrico de fibras.

La mayoría de los materiales compuestos tienen densidades entre 1.5 y 2.5g/cm³, en contraste con la densidad del acero, la cual es de 7.87g/cm³. La baja densidad de los FRPs (comparada con los metales) es lo que les proporciona altos valores de módulos específicos y resistencia específica.

- g. *Coefficiente de Poisson.* El coeficiente de Poisson para un material compuesto puede variar significativamente en relación a la orientación de las fibras. Cuando las fibras están a 0° en relación a la carga aplicada, el coeficiente de poisson con frecuencia es

similar a la mayoría de los metales, dentro de un rango de 0.25 a 0.35. Sin embargo, cuando se presentan otras orientaciones de fibras, el coeficiente de poisson puede variar considerablemente. Cuando las fibras están orientadas a 90° , el coeficiente de poisson puede ser muy pequeño, del orden de 0.02 a 0.05, debido a que las fibras que son muy rígidas resisten la contracción de la resina, por otro lado cuando las fibras están orientadas con ángulo entre 30° y 40° , el coeficiente de poisson es casi siempre grande. Para algunos materiales, el coeficiente de poisson puede ser mayor que en otros, debido a que las fibras tratan de alinearse por si mismas al aplicarse una carga. Cuando el ángulo de orientación decrece ligeramente, las fibras actúan alineando la resina con la carga, lo cual proporciona un valor muy alto para el coeficiente de poisson. Un ejemplo de este comportamiento se muestra en la figura 2.13.

- h. Coeficiente de dilatación térmica.* Como el resto de las características discutidas hasta ahora, los coeficientes de dilatación térmica son afectados perceptiblemente por la orientación de las fibras. En la tabla 2.8 se muestran las propiedades de algunos laminados unidireccionales. También se muestran los valores para el acero y el aluminio. Curiosamente, en muchos casos los materiales compuestos unidireccionales presentan un valor negativo para la dilatación térmica en la dirección de la fibra, esto se debe a que las fibras resisten la dilatación térmica de la resina en dirección de la fibra. En la dirección perpendicular a las fibras, la resina puede expandirse bastante porque las fibras no resisten la dilatación.

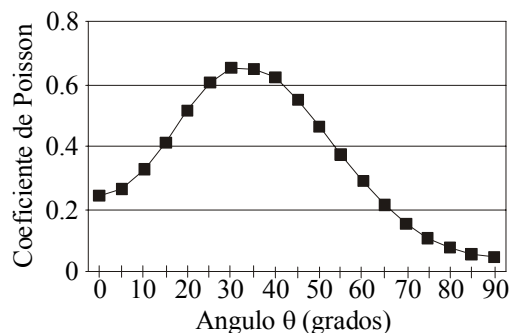


Figura 2.13. Coeficiente de Poisson en función de la orientación de las fibras de un compuesto típico de Vidrio/Poliéster con una configuración $[\theta_1/-\theta_2/\theta_1]$, donde θ es el ángulo en grados [ETL 1110-2-548, 1997].

Se debe observar que los materiales compuestos de la tabla 2.8, tienen un coeficiente de dilatación térmica (perpendicular a las fibras) considerablemente mayor al del acero. Sin embargo, es posible diseñar materiales compuestos basados en fibras de carbono o aramidas, los cuales presenten valores muy bajos del coeficiente de dilatación térmica, debido a que éstos compuestos tienen valores negativos del coeficiente en una dirección y positivos en la otra. Una buena elección de las capas que conforman el laminado puede llevar a obtener coeficientes de dilatación térmica en la estructura cercanos a cero, lo que permite el diseño de estructuras térmicamente estables. Sin embargo, la secuencia de laminado que produce un valor del coeficiente de dilatación térmica cercano a cero, probablemente no sea el de mayor resistencia. Por tanto, el diseñador posiblemente se vea en la necesidad de utilizar materiales compuestos con valores del coeficiente diferentes a cero.

Tabla 2.8. Coeficientes de dilatación térmica comunes para diferentes materiales [ETL 1110-2-548, 1997].

Materiales compuestos reforzados con fibras	Coeficiente de dilatación térmica paralelo a las fibras (m/m)°C x 10⁻⁶	Coeficiente de dilatación térmica perpendicular a las fibras (m/m)°C x 10⁻⁶
Carbono/Epoxi	-0.3	28.1
Vidrio/Epoxi	8.6	22.1
Kevlar 49/Epoxi	-4.0	79.0
Materiales isótropos	Coeficiente de dilatación térmica (m/m)°C x 10⁻⁶	
Resina epóxica	54.0	
Acero	11.8	
Aluminio	23.6	

- i. *Fluencia*. La fluencia puede ocurrir a temperatura ambiente para muchos materiales compuestos. La parte que sufre la fluencia en el compuesto generalmente es la resina. Las fibras de carbono y de vidrio no fluyen significativamente a temperatura ambiente. La fluencia está en función de la tensión, de la orientación de las fibras, del porcentaje volumétrico de fibras y de la ductilidad de la resina aplicada. La orientación de las fibras es muy importante porque cuantas más fibras estén

alineadas en dirección de la carga, la tensión será menor en la resina. Cuanta más alta es la concentración de fibras (en cualquier orientación), más bajo será la proporción de fluencia, debido a que hay menos resina disponible a deformar. Una resina dúctil fluirá más que una más frágil. De cualquier forma, la fluencia y la relajación no son generalmente un problema con resinas termoendurecidas como la epoxi, pero pueden originar un problema cuando se utilicen materiales termoplásticos de alta ductilidad.

j. Relajación. Para que un material relaje, debe primero haberse deformado. La cantidad de relajación está en relación con la tensión inicial aplicada, la orientación de las fibras, el porcentaje volumétrico de fibras y la ductilidad de la resina. Una tensión inicial más alta permite que después se presente más relajación en el material. Más fibras orientadas en la dirección de la carga disminuirán la fluencia y la relajación potencial. Una resina dúctil se deformará más que una frágil y por tanto habrá más relajación.

k. Tenacidad. La tenacidad de un material compuesto está en relación al tipo de fibras, al tipo de resina y al porcentaje volumétrico de fibras. La secuencia de capas en el laminado no parece afectar su tenacidad.

(i) Tenacidad de impacto. Las pruebas de impacto en el sentido tradicional (como las pruebas de Charpy) no se realizan habitualmente en los materiales compuestos. Los materiales compuestos basados en resina epoxi tienen dureza muy baja al impacto. Los materiales termoplásticos tienen una dureza ligeramente superior. En el “*Engineered Materials Handbook*” (1987) se reportan tenacidades de impacto para un laminado unidireccional de Vidrio/Poliéster alrededor de 972J/m, comparado con el aluminio que presenta tenacidades de 215 a 647J/m y el acero inoxidable con tenacidades entre 458 a 593 J/m.

Una prueba de impacto más común, consiste en aplicar una pequeña carga de impacto a la estructura la cual consiga dañarla pero no romperla. El daño interno causado por la carga de impacto cambiará la resistencia y la rigidez del material compuesto. La resistencia a compresión de la estructura se mide después del

impacto y se evalúa si se cumplen los requerimientos de la estructura (esta prueba no está estandarizada).

(ii) *Tenacidad de delaminación.* El mecanismo de falla de delaminación es común para este tipo de polímeros. La delaminación es la separación de un material compuesto en sus capas originales. Esto puede ocurrir debido a la vinculación relativamente débil entre capas, por lo que se deberá diseñar el material compuesto de tal forma que se evite esto. La tenacidad de delaminación está en función del tipo de resina y del porcentaje volumétrico de resina. La secuencia de las capas en el laminado no parece afectar a la tenacidad de delaminación. Cuanto más dúctil sea la resina, más alta será su tenacidad, sin embargo, no es una relación lineal, ya que también influye la interfaz resina/fibra. La presencia de fibras también puede influir disminuyendo la zona plástica de la resina disminuyendo la tenacidad del material compuesto.

El porcentaje volumétrico de resina es solamente importante para aquellas resinas de media a alta tenacidad (G_{IC} aproximadamente de 250J/m^2). Para éstas, si la cantidad de resina se incrementa, la zona plástica también aumentará (habrá menos fibras en la interfaz debido a la expansión de la resina), y por tanto aumentará su tenacidad. Para una resina frágil, la zona plástica no se extiende más allá de la región entre capas rica en resina. Al hacer esta región más grande, no aumentará la zona plástica y la tenacidad global del material compuesto no se incrementará.

Otro parámetro importante es la resistencia de la interfaz resina/fibra. Una resistencia pobre de la interfaz, producirá una tenacidad inferior a la esperada. Las tenacidades típicas de las resinas G_{IC} , están dentro del rango de 200 a $8,000\text{J/m}^2$. La tenacidad de delaminación del material compuesto está dentro del rango de 200 a $2,500\text{J/m}^2$, comparado con la del acero A36 que tiene un valor aproximado de $13,000\text{J/m}^2$.

Un problema con los laminados concierne a las juntas entre capas individuales del material compuesto. Se han desarrollado varias técnicas para prevenir la delaminación. Uno de los métodos consiste en utilizar un material más resistente

que la resina utilizada para la matriz. Otro método consiste en tener cierto refuerzo de fibras a través del espesor del laminado cosiendo las capas entre ellas.

2.3.2.4 Durabilidad

Los FRP representan una nueva clase de materiales. Su durabilidad es la razón principal para su utilización en muchas aplicaciones con una larga vida útil. Sin embargo, cuando una aplicación en específico es contemplada, es esencial conocer no solo las cuestiones y respuestas respecto a la resistencia y rigidez, sino que también la vida útil estimada según las condiciones a las que esté expuesta la estructura.

En general, la vida útil en los componentes de ingeniería civil es difícil de determinar. Existen muchos factores en juego que reducen la vida útil de los materiales, y las características de la mayoría de éstos cambian por la interacción con su entorno a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en el caso del acero, la oxidación conduce a la corrosión y la presencia de agua acelera este proceso. ¿Qué es lo que sucede entonces con los FRP bajo unas condiciones de servicio determinadas? Si estos cambios se conocen de antemano se tendrían que tomar en cuenta en el diseño. Así que, para incluir estos cambios en el diseño, será necesario conocer su magnitud y efectos en el comportamiento del FRP.

En un principio también es importante definir cuál es la vida útil de la estructura; eso significa que debe determinarse cuando termina la función eficaz después de su período de servicio. Por ejemplo, algunos materiales, incluyendo los materiales compuestos poliméricos, no fallan bajo ciertas condiciones de carga de servicio, pero pueden continuar deformándose más allá de un límite aceptable. Así, bajo estas condiciones, la vida útil cesa cuando se excede un límite predeterminado de deformación o de flecha.

Son bien conocidos los mecanismos que controlan la durabilidad de los materiales compuestos. Incluyéndose en éstos: (1) cambios químicos o físicos de la matriz del polímero, (2) pérdida de adherencia o despegue a nivel de la interfaz fibra/matriz, y (3) reducción de la resistencia y del módulo de elasticidad de la fibra. El ambiente juega un papel crucial en la modificación de las características de la matriz en los materiales compuestos poliméricos. Cuando se habla del “ambiente” se refiere tanto al ambiente circundante como a las condiciones de carga, debido a que ambos pueden afectar la

durabilidad de los materiales compuestos. Tomando en cuenta el ambiente circundante, se puede constatar que la matriz y las fibras pueden ser afectadas por la humedad, la temperatura, la luz del sol (radiación UV), el ozono, y la presencia de productos químicos que degradan al material compuesto tales como: sales o álcalis.

Las exposiciones repetidas a temperaturas muy altas y bajas (ciclo hielo-deshielo), pueden introducir también algunos cambios. Bajo condiciones en donde se presentan varias repeticiones de ciclos carga-descarga puede aparecer fatiga en los materiales compuestos como en el acero. La carga sostenida durante mucho tiempo puede originar que el material fluya. En este apartado resumiremos brevemente los efectos de varios factores que pueden afectar la durabilidad de los compuestos de FRP.

Sin embargo, es importante observar que debido a la novedad relativa de estos materiales existe un vacío considerable en relación a los datos relacionados con la durabilidad de los compuestos poliméricos. Las investigaciones sistemáticas para predecir la vida de este tipo de materiales en la construcción civil son raras y en muchos casos los datos disponibles no son relevantes para su uso práctico. Además hay falta de representatividad de los ensayos acelerados.

a. *Envejecimiento físico de la matriz del polímero.* Uno de los aspectos importantes a considerar en la durabilidad de los materiales compuestos es el papel de la matriz del polímero y sus cambios. El papel principal de la matriz en los materiales compuestos es transferir tensiones entre fibras, proporcionar una barrera contra un ambiente agresivo, y proteger la superficie de las fibras contra la abrasión mecánica. Aunque su papel en la capacidad portante es de menor importancia, tiene una influencia trascendental en la transferencia interlaminar de fuerzas de cizallamiento. Por lo tanto, debe de haber cierta preocupación si la matriz del polímero cambia sus características por sí misma con el tiempo. Es normal que todos los polímeros experimenten un cambio extremadamente lento en su estructura molecular. El ambiente, principalmente la temperatura y la humedad, controla este cambio. Este proceso se conoce como envejecimiento. Lo que sucede es que cuando un polímero se enfría por debajo de la temperatura de cristalización, el material no alcanza el equilibrio termodinámico instantáneo. En lugar de esto, su equilibrio de volumen libre se desarrolla en un cierto plazo, y durante este tiempo las características mecánicas pueden cambiar [MONAGHAN & BRINSON,

1994]. Sin embargo, es importante observar que polímeros con diversas configuraciones moleculares dentro del mismo grupo de polímeros responden de manera diferente al mismo tipo de ambiente. Los efectos del envejecimiento físico son menos severos en los materiales compuestos termoendurecidos que en los termoplásticos. Como resultado del envejecimiento físico, algunos polímeros pueden llegar a ser más rígidos y frágiles, pudiendo tener influencia en las características de la matriz, modificando así la respuesta al cizallamiento y al cortante. Pero en la mayoría de los casos estos efectos no son críticos porque el proceso de transferencia de carga ocurre en última instancia a través de las fibras, y los efectos del envejecimiento en éstas son mínimos. Aunque los cambios físicos causados por el envejecimiento son totalmente reversibles una vez que el material polimérico se calienta sobre su temperatura de cristalización, éste no será aplicable a las estructuras de ingeniería civil, puesto que nunca se alcanzarán la temperatura de cristalización.

b. *Influencia de la humedad.* Cuando los compuestos poliméricos se exponen a la humedad del aire o al agua, éstos absorben la humedad por absorción superficial instantánea y difusión. Generalmente la concentración de humedad aumenta con el tiempo hasta alcanzar el punto de saturación (equilibrio), después de varios días de exposición al ambiente húmedo. El periodo para alcanzar el punto de saturación

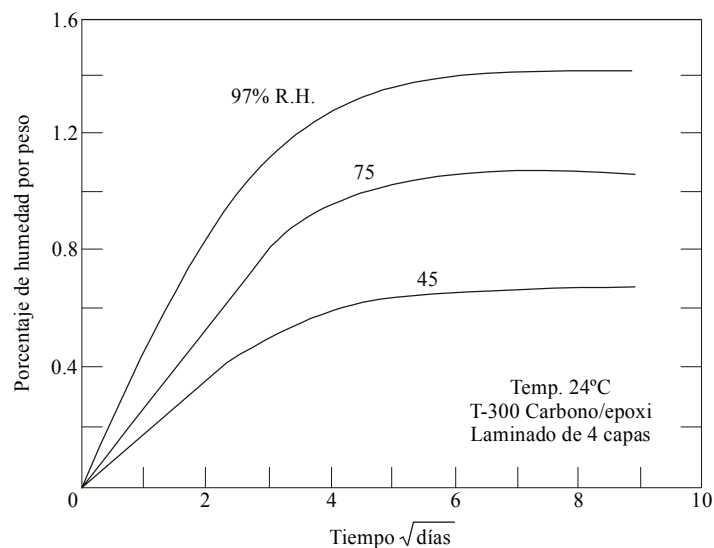


Figura 2.14. Absorción de agua. Comportamiento de compuestos poliméricos [ETL 1110-2-548, 1997].

depende del grosor del material compuesto y la temperatura ambiente. El secado puede invertir el proceso, aunque muchas veces no se recuperen las características iniciales. La absorción del agua en los compuestos poliméricos sigue por lo general la ley de difusión de Fick. En la figura 2.14 se muestra el comportamiento de difusión típico de una resina de epoxi reforzada con fibras de carbono. En realidad, el índice exacto de absorción de humedad depende de varios factores incluyendo: contenido de vacíos, tipo de la fibra, tipo de resina, orientación de la fibra, la temperatura, nivel de tensión, presencia de microfisuras, y gradientes térmicos.

(i) *Influencia de la humedad en la matriz del polímero.* En algunos casos, la absorción del agua por la resina puede cambiar las características de ésta, incluyendo la temperatura de cristalización. Sin embargo, esto no es de mayor importancia en las aplicaciones relacionadas con la ingeniería civil de los materiales compuestos, ya que esto sucede a temperaturas superiores a 120°C. La absorción de humedad tiene un efecto favorable en el material compuesto, ya que origina la expansión de la resina, la cual reduce las tensiones de compresión residuales en la interfaz fibra/matriz causadas por la retracción de curado. Hahn y Kim (1978) reportaron que en los materiales compuestos donde se presentan vacíos en la interfaz fibra/matriz o en las capas del compuesto, la inclusión del agua en los vacíos o interfaces pueden causar la plastificación de la resina. El agua atrapada en vacíos puede dar lugar a la formación de burbujas. Sin embargo, los problemas se pueden eliminar por la selección minuciosa de los materiales, del tratamiento superficial apropiado y de las técnicas de fabricación.

(ii) *Influencia de la humedad en las fibras.* Comúnmente se tiene la creencia de que las fibras de vidrio pueden dañarse por la exposición prolongada al agua. Las razones son que los cristales están constituidos por sílice, en los cuales, los óxidos de metales alcalinos se encuentran dispersos. Los óxidos de metales alcalinos son hidroscópicos e hidrolizables. Sin embargo, la forma más común de las fibras de vidrio para las aplicaciones de ingeniería civil son el “*E-glass*” y “*S-glass*”, que contienen solamente cantidades pequeñas de óxidos de metales alcalinos, por lo que son resistentes al agua. Sin embargo, los compuestos de fibras de vidrio se deben fabricar cuidadosamente para evitar cualquier inclusión importante de agua, porque la presencia del agua en la interfaz de la fibra de

vidrio baja su energía superficial lo que pueda favorecer el crecimiento de grietas. Además, los períodos largos de degradación a altas temperaturas no se han estudiado. Las fibras de aramida pueden absorber cantidades considerables de agua dando como resultado la expansión del material. Sin embargo, la mayoría de las fibras son protegidas con un recubrimiento, asegurando así una buena vinculación con la matriz y protegiéndolas contra la absorción del agua. No se conocen efectos de degradación originados por la humedad en las fibras del carbono [MALLICK, 1988].

(iii) *Comportamiento general de los materiales compuestos saturados por agua.* Los materiales compuestos saturados por agua presentan generalmente un incremento en la ductilidad, debido al ablandamiento de la matriz. Este podría ser un aspecto positivo de la absorción del agua en compuestos poliméricos y se podría utilizar posiblemente en algunos casos específicos. La degradación limitada de la resistencia y del módulo de elasticidad puede presentarse en materiales compuestos saturados por agua. Los cambios originados por la degradación son reversibles en su mayoría, de tal modo, que al secarse el compuesto recupera la mayoría de las características perdidas.

También es interesante observar que el aumento de la presión hidrostática (por ejemplo, donde los compuestos se utilizan para aplicaciones submarinas) no aumenta necesariamente la absorción de agua y por lo tanto, no contribuye a la degradación del compuesto. Así, se espera que la mayoría de las estructuras poliméricas subacuáticas tengan alta durabilidad. De hecho, bajo presión hidrostática la absorción de agua se reduce levemente debido al cierre de las microfisuras y de los defectos superficiales [BURNSELL, 1989]. Sin embargo, la investigación llevada a cabo recientemente por el “*Naval Surface Warfare Center*” indica que puede ocurrir un aumento significativo de la humedad en algunos tipos de materiales compuestos debido a la presión hidrostática.

La absorción del agua afecta las características dieléctricas de los materiales compuestos, debido a que la presencia de microfisuras llenas de agua puede disminuir esta característica drásticamente.

c. *Efectos higrotérmicos.* La temperatura juega un papel crucial en el mecanismo de la absorción del agua en los materiales compuestos y de sus efectos irreversibles subsecuentes, ya que influye directamente en la distribución del agua, en la cantidad de ésta, y en la velocidad a la cual se absorbe. Cuando la temperatura aumenta, la cantidad y la velocidad de absorción de agua se incrementa rápidamente, según lo demostrado por Dewimille y Burnsell (1983). Han demostrado que los daños inducidos por la inmersión en agua hirviendo por sólo unas horas producen despegue y agrietamiento de la misma magnitud que en agua a 50°C durante 200 días. A temperatura ambiente los mismos especímenes no demostraron ningún indicio de daño. Estas observaciones condujeron al desarrollo de una técnica para pruebas aceleradas de envejecimiento para los materiales compuestos.

d. *Ambiente alcalino.* Al usar compuestos basados en fibra de vidrio en ambientes alcalinos, es esencial asegurarse de que la fibra de vidrio sea resistente a un alto contenido de álcalis, porque la solución alcalina reacciona con las fibras de vidrio formando geles de sílice expansivos. Esta precaución es especialmente importante para el uso de barras de refuerzo en el hormigón fabricadas a partir de fibra de vidrio reforzada. Las barras reforzadas de fibra de vidrio y poliéster, se están utilizando cada vez más como sustitutos de barras de refuerzo en los pavimentos que son degradados al descongelarse la sal de deshielo. Sin embargo, durante la hidratación del hormigón se crea una solución de agua en los poros altamente alcalina (es decir, $pH > 12$). Esta solución alcalina puede afectar la fibra de vidrio y reducir la durabilidad de las barras. Se considera que las fibras relativamente baratas “*E-glass*” no tienen resistencia suficiente contra el ataque del álcali.

Se ha observado que las resinas de vinilo proporcionan una barrera eficaz contra el ataque del álcali. La resistencia al ataque del álcali puede también prevenirse diseñando el miembro estructural para bajos niveles de tensión. La fibra de vidrio resistente a los álcalis puede mejorar la durabilidad. Existe una investigación continua en relación a mejorar los efectos a largo plazo de las fibras de vidrio contenidas en una matriz polimérica en ambientes altamente alcalinos. Los resultados de la investigación, mejorarán la durabilidad de los materiales compuestos de FRP en ambientes alcalinos. Debe observarse también que los compuestos de fibra de carbono y de aramida no son susceptibles a la degradación del ambiente alcalino.

e. *Efectos de las bajas temperaturas.* Los cambios extremos de temperatura en los materiales compuestos dan lugar a varios efectos importantes. La mayoría de los materiales se dilatan cuando se eleva la temperatura. En los materiales compuestos reforzados con fibras embebidas en una matriz polimérica, el coeficiente de la dilatación térmica de la matriz es generalmente mayor que el de las fibras. Una disminución en la temperatura, debido al enfriamiento durante el proceso de fabricación o unas condiciones de funcionamiento a baja temperatura, harán que la matriz se contraiga. La contracción de la matriz es resistida por las fibras relativamente rígidas a través de la vinculación con la interfaz fibra/matriz, originando tensiones residuales en la microestructura del material. La magnitud de estas tensiones residuales es proporcional a la diferencia en temperaturas del momento del curado y del funcionamiento del material compuesto, a excepción de un ambiente extremadamente frío en donde las tensiones residuales inducidas no son de mayor importancia. Donde existen grandes diferencias en la temperatura (por ejemplo, en el ártico y las regiones antárticas), las tensiones suficientemente grandes pueden inducir a la microfisuración del material. Estas microfisuras pueden reducir la rigidez del compuesto, aumentar la permeabilidad y la inclusión del agua a través de la interfaz fibra/matriz, y finalmente contribuir así a los procesos de degradación.

Otro efecto muy importante de las bajas temperaturas es el cambio del módulo de elasticidad en la matriz. La mayoría de las resinas llegan a ser más rígidas y más resistentes mientras más baja la temperatura pero consecuentemente más frágiles. Estos cambios pueden influenciar en los mecanismos de falla. Por ejemplo, los ensayos a compresión realizados por Dutta (1994) en probetas cilíndricas de 38mm de diámetro en una cámara climática a -50°C , donde a baja temperatura la resistencia a compresión aumentó un 17.6%, pero el material falló más violentamente. La absorción de la energía antes de rotura a baja temperatura es más alta que a temperatura ambiente. Este aspecto particular debe ser considerado al diseñar materiales compuestos en donde se presenten cargas de impacto a temperaturas muy bajas.

f. *Efectos del ciclo hielo-deshielo.* A menos que un material compuesto contenga un porcentaje significativo de vacíos interconectados que estén llenos de agua, los efectos del proceso hielo-deshielo dentro del rango de temperatura normal (-20°C a

30°C) no serán significativos en la resistencia. Los materiales compuestos de fibra de vidrio comerciales contienen generalmente cerca del 0.4% de vacíos, lo que no permite que ninguna humedad congelada apreciable cause algún daño importante.

Sin embargo, el completar un ciclo térmico de baja temperatura tiene otros efectos en los materiales compuestos, ya que aparecen tensiones residuales debido al gradiente del coeficiente de dilatación térmica de los elementos constitutivos de la microestructura del material. Bajo condiciones extremas de baja temperatura, estas tensiones pueden dar lugar a la formación de microfisuras en la matriz y/o en la interfaz resina/fibra. La incidencia de crecimiento de las microfisuras dentro del rango normal de temperaturas de servicio (-20°C a 30°C), son generalmente raras o insignificantes. Sin embargo, bajo condiciones que completan ciclo térmicos severos, por ejemplo, entre 60°C y -60°C, las microfisuras pueden crecer y unirse para formar grietas en la matriz que pueden propagarse alrededor de la interfaz fibra/matriz [LORD & DUTTA, 1988]. Bajo ciclos térmicos prolongados, éstas continúan creciendo de tamaño y número, pudiendo dar lugar a degradación en la rigidez entre otras características importantes de la matriz.

El número limitado de las pruebas conducidas en bajas temperaturas (por debajo de -50°C) en materiales compuestos en el “*Cold Regions Research and Engineering Laboratory*” (CRREL), ha develado algunos problemas básicos de diseño con los materiales compuestos en relación a seguridad y durabilidad en ambientes extremadamente fríos [DUTTA, 1992]. Se ha observado que en temperaturas muy bajas, la resistencia a tracción en dirección de las fibras de todos los compuestos poliméricos tiende a disminuir, aunque la resistencia a tracción fuera del eje de las fibras y la resistencia transversal aumentan. Este fenómeno se explica por el endurecimiento de la matriz polimérica en temperaturas muy bajas. Los ciclos térmicos prolongados en temperaturas extremas, también han demostrado la degradación de la resistencia a tracción fuera del eje de las fibras y de la rigidez. Estos cambios de las características son importantes para el diseño de estructuras en regiones extremadamente frías.

g. *Influencia de la radiación ultravioleta (UV)*. El efecto de la luz ultravioleta en compuestos poliméricos es bien sabido. En la exposición prolongada a la luz del sol la matriz puede endurecer y descolorarse. El problema es superado generalmente aplicando una capa resistente a los UV a los materiales compuestos. La mayor

preocupación radica en la degradación de FRP tal como la aramida. Un ejemplo de esto se demuestra con la pérdida de resistencia (50%) registrado en tejido de aramida, después de la exposición al sol por un periodo de cinco semanas [LARSSON, 1988]. Sin embargo, solamente la capa externa de la estructura compuesta sufre este tipo de degradación. Así pues, en materiales compuestos con grosores importantes el efecto de la degradación es mínimo. Para las aplicaciones en donde las características superficiales son importantes, se deberán realizar consideraciones especiales para reducir grietas en la superficie debidas a los rayos del sol.

h. *Fluencia*. La fluencia es el aumento de la deformación con tiempo en un estado permanente de tensiones. La fluencia se produce debido a la combinación de la deformación elástica y del flujo viscoso. Cuando la tensión se suprime después de un período de tiempo, la deformación elástica se recupera inmediatamente, pero la deformación causada por el flujo viscoso se recupera lentamente a un valor asintótico, llamado deformación recuperada (Figura 2.15).

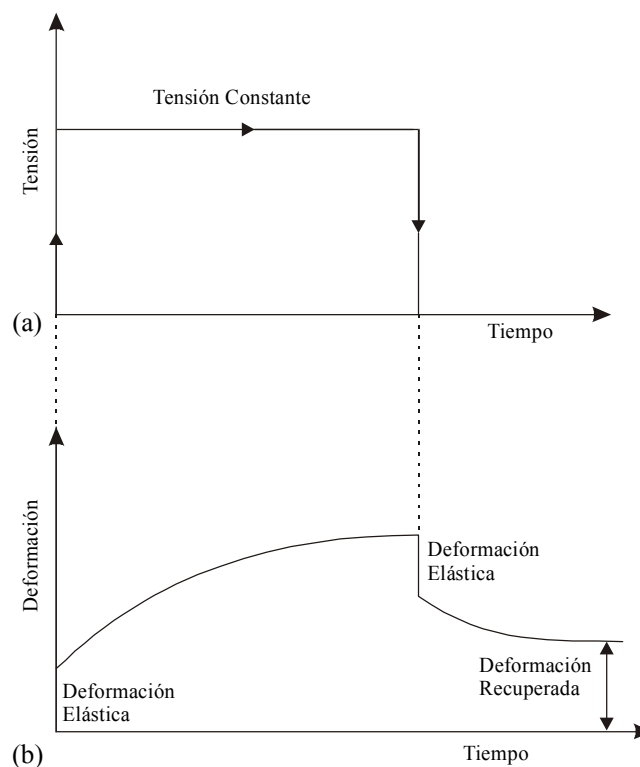


Figura 2.15. Comportamiento típico de fluencia en compuestos poliméricos [ETL 1110-2-548, 1997].

En los materiales compuestos, la deformación por fluencia depende del nivel de tensiones y de la temperatura y en función de la distribución de tensiones entre la fibra y la matriz. En general, un material compuesto termoendurecido y altamente reticulado presenta niveles más bajos de fluencia que un material termoplástico. A excepción de las fibras de aramida, las fibras de refuerzo comerciales tales como las de carbono y de vidrio no presentan fluencia apreciable cuando se someten a cargas normales.

Los valores de la fluencia para los materiales compuestos pueden ser generados a partir de ensayos de fluencia a tracción o a flexión durante algunas horas, y a partir de estos datos se puede predecir el comportamiento a largo plazo por el método de la superposición de tiempo-temperatura.

El módulo de un polímero (E) en el tiempo t y a la temperatura T_0 pueden relacionarse con su módulo en el tiempo t_1 y la temperatura T_1 por la ecuación siguiente [MALLICK, 1988].

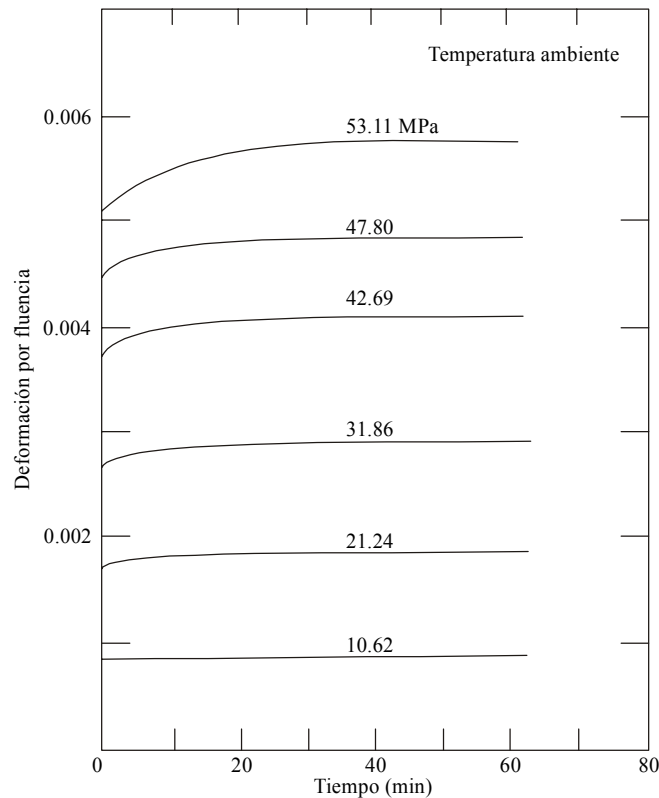


Figura 2.16. Curvas de fluencia por tracción de un compuesto de vinilo-éster/glass a varios niveles de carga [MALLICK, 1988].

$$E(t, T) = (\rho_l T_l / \rho_0 T_0) E(t_l, T_l) \quad (2.6)$$

donde ρ_l y ρ_0 son las densidades del polímero a las temperaturas absolutas T_l y T_0 respectivamente.

La figura 2.16 muestra las curvas de fluencia a tracción para un material compuesto para varios niveles de tensión. Para la orientación de la fibra $\theta = 0^\circ$, la fluencia es prácticamente constante. La fluencia en la dirección longitudinal de los materiales compuestos es insignificante, sin embargo, para otros ángulos de orientación de la fibra la deformación por fluencia puede ser significativa. Por esto, es importante en diseños de compuestos poliméricos, reconocer la influencia de la fluencia cuando las tensiones son perceptiblemente grandes fuera del eje de las fibras.

Para un período de tiempo prolongado, una carga sostenida puede inducir a la falla en un material propenso a la fluencia. El tiempo en el cual ocurre la falla se denomina “*tiempo de vida*” o “*tiempo de rotura bajo tensión*”. Para un material compuesto dado, los ensayos a rotura por tracción se realizan generalmente para determinar un rango de tensiones y de tiempos de vida dentro de los cuales el material puede considerarse seguro bajo estados estáticos de carga a largo plazo. La relación entre el nivel de tensión y el tiempo de vida se representa a menudo como:

$$\sigma_u = A - B \log t \quad (2.7)$$

donde σ_u es la resistencia a tracción estática, y A y B son constantes empíricas.

Las fibras de vidrio y de aramida en un período de tiempo largo, presentan falla por rotura bajo tensión. Las fibras de carbono son relativamente menos propensas a este tipo de falla. Glaster y sus compañeros de trabajo (1983, 1984) realizaron un extenso trabajo de investigación relacionada con la rotura bajo tensión para materiales compuestos de aramida y de “*S-glass*”.

i. *Fatiga*. Las propiedades de la fatiga de un material estructural representan su respuesta a las cargas cíclicas. Las cargas cíclicas repetidas dan lugar generalmente a una disminución en la resistencia de los materiales metálicos. Por otra parte, se considera generalmente que los materiales compuestos tienen una respuesta excelente a la fatiga.

El comportamiento a la fatiga de un material es caracterizado generalmente por un diagrama de $S-N$, que representa la relación que existe entre la amplitud de la tensión (S) y el número de ciclos (N) hasta llegar a la falla, en una escala semilogarítmica (Figura 2.17). En general, el número de ciclos hasta la falla aumenta cuando se reduce el nivel de tensión. Para el acero suave, el límite de fatiga está por el orden de 10^5 - 10^6 ciclos al 50% de su resistencia última a tracción. Debajo del límite de la fatiga, la probabilidad de ocurrir la falla por fatiga es muy baja, de modo que la vida del material se considera infinita.

Uno de los problemas principales para predecir el límite de falla por fatiga en materiales compuestos es la complejidad en la determinación de los modos de falla. El ensayo más utilizado para la caracterización a fatiga de los materiales compuestos es el ciclo Tracción-Tracción. El ciclo Tracción-Compresión para los ensayos de fatiga a flexión también se está divulgando. El método para realizar el ensayo de fatiga de Tracción-Tracción se describe en la norma ASTM D 3479.

La respuesta a la fatiga de ciclos Compresión-Compresión de los materiales compuestos es generalmente menos satisfactoria que en ciclos Tracción-Tracción. En las cargas a fatiga por flexión, por lo tanto, el daño inicial se origina generalmente en el lado comprimido del espécimen.

Una característica única de un material compuesto en la prueba de la fatiga es que presenta una degradación gradual al incrementarse los ciclos. Así, a veces las pruebas no se realizan para una tipo de falla representativa, sino para un límite de la rigidez del espécimen o de las tensiones residuales previamente determinadas

La curva $S-N$ para los materiales compuestos se puede representar por una relación lineal dada por:

$$S = \sigma_u (m \log N + b) \quad (2.8)$$

donde,

S = La tensión máxima de la fatiga.

σ_u = Resistencia estática.

m, b = Constantes.

N = Número de ciclos hasta la falla

Los valores de m y b para un compuesto de Vidrio/epoxi con la orientación de la fibras $\theta = 0^\circ$ es 0.1573 y 1.3743, respectivamente [LORENZO Y HAHN 1986].

Generalmente se ha observado que en los ensayos a fatiga con ciclos Tracción-Tracción, los materiales compuestos unidireccionales de carbono y de aramida presentan una resistencia excepcionalmente buena frente a la fatiga. Por otra parte, cuando las fibras se orientan en direcciones fuera del eje longitudinal, la resistencia a la fatiga depende muy a menudo de la proporción de fibras alineadas con el eje de carga, la secuencia de las capas, y los parámetros del ciclo de carga. Debe de observarse que el ciclo Tracción-Compresión puede generar un diagrama $S-N$ más irregular que el del ciclo Tracción-Tracción. La respuesta frente a la fatiga de los materiales compuestos de fibras

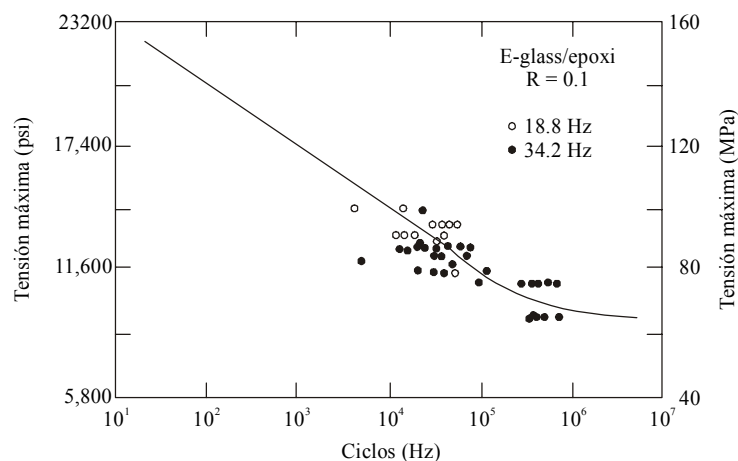


Figura 2.17. Comportamiento típico de fatiga de un compuesto de E-glass/epoxi [ETL 1110-2-548, 1997].

reforzadas de “S-glass” es menor que en los compuestos de carbono o de aramida. Los resultados de una prueba de la fatiga con ciclos Tracción-Tracción para un laminado E-glass/epoxi con una orientación de fibras $\theta = 0^\circ$ se muestran en la figura 2.17.

j. *Inflamabilidad y resistencia al fuego.* Uno de los problemas a los que se enfrentan los FRP es la susceptibilidad al fuego, debido a que las resinas típicas pierden cualquier función adherente por encima de los 80°C [FREYSSINET, 1998]. Los compuestos de FRP utilizados para cualquier construcción debe cumplir con los requisitos del código de la construcción local, incluyendo especificaciones de resistencia al fuego y otras de seguridad al usuario. Actualmente la normativa para los materiales compuestos estructurales en edificaciones u otro tipo de construcciones no es extensa. Es, por lo tanto, imprescindible que los diseñadores trabajen desde un principio en conjunto con las autoridades encargadas de la construcción para establecer en el proceso de selección los requisitos de resistencia al fuego de los materiales compuestos seleccionados, para que puedan ser verificados con los ensayos frente al fuego. Cuando existe el peligro del fuego, las características relacionadas a la protección contra el fuego (incluyendo el uso previsto para la estructura, las fuentes de ignición potenciales, modo potencial de la extinción del fuego y del humo, y los medios para la detección, la supresión, y la extinción) deben ser identificadas en conjunción con el código de construcción apropiado. Los estándares específicos para los plásticos en un código modelo de un edificio, han sido resumidos por Heger (1981).

Los ensayos contra el fuego para los materiales compuestos de FRP deben basarse en su uso final, cantidad, la localización, y requisitos especiales determinados por el dueño. Después de identificar el riesgo de incendios, un método conveniente para realizar los ensayos se debe seleccionar a partir de estándares o desarrollar un ensayo adecuado para la necesidad específica. Dentro de estos ensayos se incluyen: pruebas de ignición, pruebas de extensión de la llama, la extinción, la evaluación del humo, pruebas de toxicidad y resistencia al fuego. La tabla 2.9 resume algunas de las pruebas estandarizadas en relación al fuego. Una revisión de la literatura de la industria relacionada con los materiales compuestos de FRP, demuestra que las características relacionadas con la inflamabilidad de estos productos son especificadas generalmente por los fabricantes.

Tabla 2.9. Ensayos contra fuego de materiales de construcción [ETL 1110-2-548, 1997].

Tipo de Ensayo	Metodología (normativa)	Objeto del ensayo
Ensayos de ignición	ASTM D 1929	Medición de la temperatura de ignición
	ASTM E 136	Clasificación DE los materiales como combustibles o no combustibles
Ensayos de propagación de llama	ASTM 84 (ensayos en túnel)	Medición de la propagación de las llamas en la superficie, generación de humo y liberación total de calor
	UL-94	Medición de la inflamabilidad en especímenes verticales en forma de barra
Ensayos de evaluación de humos	NFPA 258	Medición de la densidad óptica máxima para el humo
Ensayos de resistencia al fuego	ASTM E 119	Determina la penetración de la llama en la cara no expuesta y el colapso estructural

2.3.3 Aplicación de los FRP como refuerzo externo en estructuras de hormigón

Los materiales de las estructuras tradicionales son pesados y requieren una cantidad considerable de trabajo para su mantenimiento. Si una nueva rama de materiales estructurales fueran fuertes, ligeros y más resistentes a la corrosión, parásitos, impactos y ataque químicos, pasarían a ser buenos sustitutos del acero, hormigón y la madera.

El “*Fiber Reinforced Polymer*” (FRP) es un material que tiene el potencial de satisfacer estos requerimientos. Aunque el FRP como refuerzo es la rama más extendida dentro de las aplicaciones de los materiales compuestos en la construcción, existen otros sectores de investigación en la línea general de este tipo de materiales dentro de la ingeniería civil. Por esto, para distinguir la técnica de “*hormigones de altas prestaciones con fibras cortas*” (FRC), de los “*Fiber Reinforced Polymer*”, la comunidad científica internacional pasó a designar a estos últimos con las siglas FRP, de acuerdo con la norma ISO 8930 [EUROCOMP, 1996]. Curiosamente, Japón siendo uno de los mayores productores de este tipo de materiales ha adoptado su propia literatura técnica para designarlo “*Continuous Fiber Reinforcing Materials*” con las siglas CFRM [JSCE,

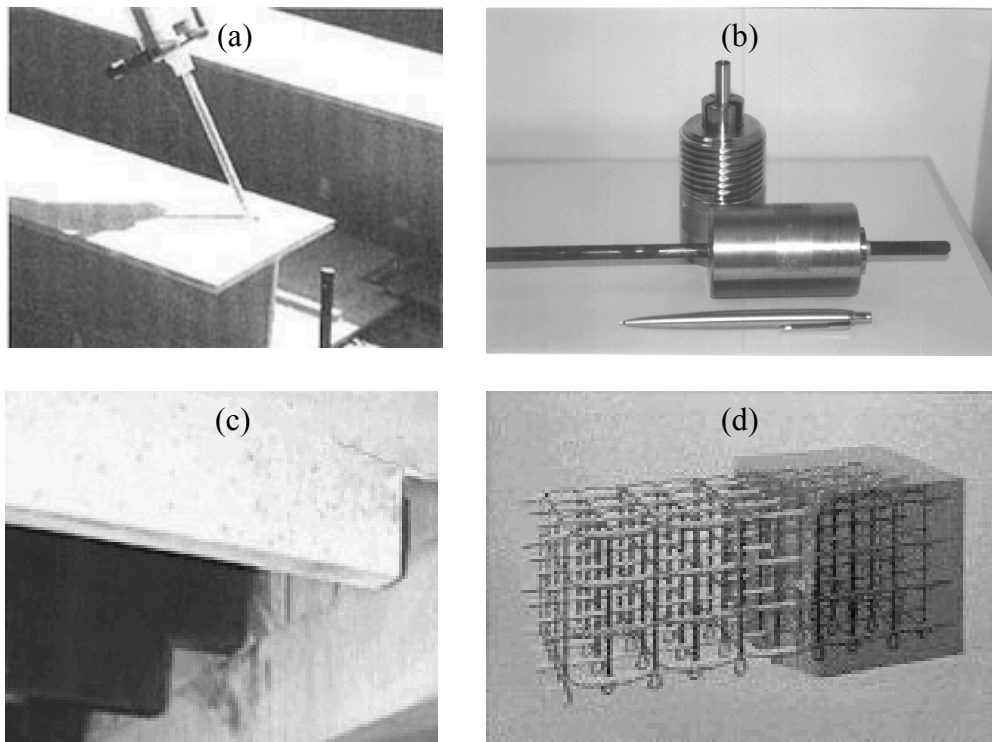


Figura 2.18. Ejemplos de aplicaciones de los FRP en la construcción. (a) Perfiles estructurales. (b) Refuerzo de vigas de hormigón. (c) Tendones de pretensado. (d) Sistema estructural.

1997]. Algunas tecnologías que han sido desarrolladas usando FRP en los últimos años se mencionan a continuación:

- a. *Perfiles estructurales*: Utilizando el FRP se pueden fabricar perfiles estructurales de sección constante como perfiles W y secciones tubulares a través del proceso de pultrusión. Casi cualquier sección puede ser creada con este proceso, obteniendo buenas características en cuanto a resistencia, son muy ligeras y prácticamente no requieren mantenimiento, además de poder ser izados fácilmente. Figura 2.18 (a).
- b. *Tendones de pretensado*: Por lo general el presfuerzo del hormigón se aplica mediante cables de acero de alta resistencia para ayudar a resistir los esfuerzos de tracción en el hormigón, reduciendo fisuración y flechas. El FRP tiene muchas propiedades que lo hacen ser mejor candidato como tendón de pretensado en las estructuras de hormigón comparado con el acero, incluyendo

su gran resistencia a la tracción, su flexibilidad, su ligereza y su resistencia a la corrosión. Especialmente, como el FRP no sufre los ataques de la intemperie es un candidato ideal para usarse como pretensado exterior. Además no precisa del uso de vainas, lo que reduce la mano de obra y el tiempo de colocación. Las únicas limitaciones que tiene para su utilización son que su comportamiento no está totalmente entendido, su bajo módulo de elasticidad, y la incertidumbre en cuanto a la resistencia, al rozamiento y a la fatiga, además de inconvenientes en los sistemas de anclaje debido a su anisotropía. Si el FRP quiere ser utilizado como tendón de pretensado se tendrán que resolver estos inconvenientes. Figura 2.18 (b).

- c. *Refuerzo para hormigón:* El FRP reúne todos los requerimientos para resistir los esfuerzos de tracción en el hormigón armado y elimina muchas de las características indeseables del acero. Puede ser utilizado en aplicaciones que requieren refuerzo en una, dos y tres dimensiones, aunque el proceso de pultrusión solamente sirve para producir refuerzo unidimensional. Los otros dos tipos de configuración son desarrollados tejiendo fibras e impregnándolas de resina. Figura 2.18 (c).

- d. *Sistemas estructurales:* El FRP puede ser utilizado para crear sistemas estructurales de construcción, que tengan suficiente resistencia para resistir las cargas de servicio y puedan disminuir el costo durante el ciclo de vida de la estructura, comparado con los sistemas tradicionales. Además los elementos pueden ser prefabricados lo que reduce el tiempo de construcción e incrementa el control de calidad. Figura 2.18 (d).

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo de investigación, los beneficios que presentan este tipo de materiales para la ingeniería civil son entre otros: el bajo peso específico, su alta resistencia y rigidez, excelente resistencia a la agresión ambiental, posibilidad de admitir propiedades direccionales a nivel estructural, eléctrico y magnético, facilidad constructiva, resistencia a la corrosión [EUROCOM, 1996]. Estos factores combinados con los bajos costos de mantenimiento e instalación. Cuando el proceso de fabricación es perfecto e industrializado, el coste inicial es bajo. Todos estos

factores podrían hacer líder al FRP como medio de reparación, en comparación a los materiales tradicionales.

Sin embargo, una de las barreras para la implementación de estas tecnologías es que el uso del FRP no ha sido totalmente aceptado por las autoridades que emiten los códigos de construcción. Algunos asuntos no han sido solucionados, como la resistencia al fuego (resinas), retracción térmica, aplicación a determinadas tipologías estructurales y aparición súbita de algunos mecanismos de falla no deseados.

La aplicación de FRP como refuerzo externo en las estructuras de hormigón ha sido estudiada por varios investigadores y se ha utilizado para reparar elementos estructurales de hormigón, como columnas, losas, vigas; en estructuras como puentes, estacionamientos y otros.

La aplicación de FRP como refuerzo de vigas de hormigón es quizá la que ha recibido la mayor atención en la comunidad investigadora; reportándose mejoras en resistencia y rigidez de las vigas.

La ganancia teórica de resistencia a flexión usando FRP como refuerzo externo puede ser significativa, aunque se han observado también nuevos tipos de falla que pueden limitar esta ganancia. Estas fallas son casi siempre frágiles, produciéndose el despegue del FRP, arrancando capas de hormigón y colapsando por cizallamiento la estructura, y pueden ocurrir ante cargas significativamente más bajas que la resistencia de diseño del sistema de refuerzo. Por esto existe la necesidad de entender mejor los mecanismos de falla en las vigas reforzadas con láminas de FRP.

Algunos investigadores han indicado que los criterios de falla para sistemas de refuerzo basados en láminas de FRP necesitan ser establecidos [SAADATMANESH & EHSANI, 1989; TRIANTAFILLOU & DESKOVIC, 1991). La aplicación efectiva de FPR al hormigón no será posible hasta entender mejor estos mecanismos de falla.

El éxito del FRP, como se ha mencionado, se encuentra en su alta resistencia a la tracción, además de su buen comportamiento a la corrosión, fatiga y baja densidad [MEIER, 1992]. Las fibras comúnmente usadas incluyen E-Glass (fibra de vidrio),

Kevlar/Aramida y Carbono, las cuales pueden ser preimpregnadas en matrices, alineadas unidireccionalmente en hojas laminadas o tejidas bidireccionalmente. La aplicación generalmente incluye la preparación de la superficie del hormigón a través de procesos químicos o mecánicos seguidos de la impregnación de la superficie mediante una resina epóxica, para después colocar la fibra por un proceso llamado “wet layup”, en la que el adhesivo forma parte de la matriz creando un enlace muy fuerte sujetando las fibras para resistir las fuerzas de despegue en superficies rugosas [KAISER, 1989].

Las hojas de FRP preimpregnadas se pegan con una capa de epoxi en la superficie rugosa. En esta fase la rigidez de la adherencia es crucial para una eficaz transferencia de esfuerzos entre el hormigón y la fibra. El espesor de las láminas es usualmente de 1 a 3 mm.

Esta técnica de refuerzo en estructuras de hormigón ha sido aplicada en todo el mundo. La primera aplicación de FRP en estructuras de hormigón fue para restaurar la integridad de un puente [EMPA, 1994], el cual tenía un tendón de pretensado dañado. Se utilizaron láminas de CFRP, aplicadas desde una plataforma móvil. Otra de las aplicaciones fue en un puente de carretera en el que se utilizaron hojas de GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic), para reducir la tensión en el acero de pretensado en la zona de acopladores [ROSTASY et al., 1992]. También se ha utilizado GFRP, para aumentar la

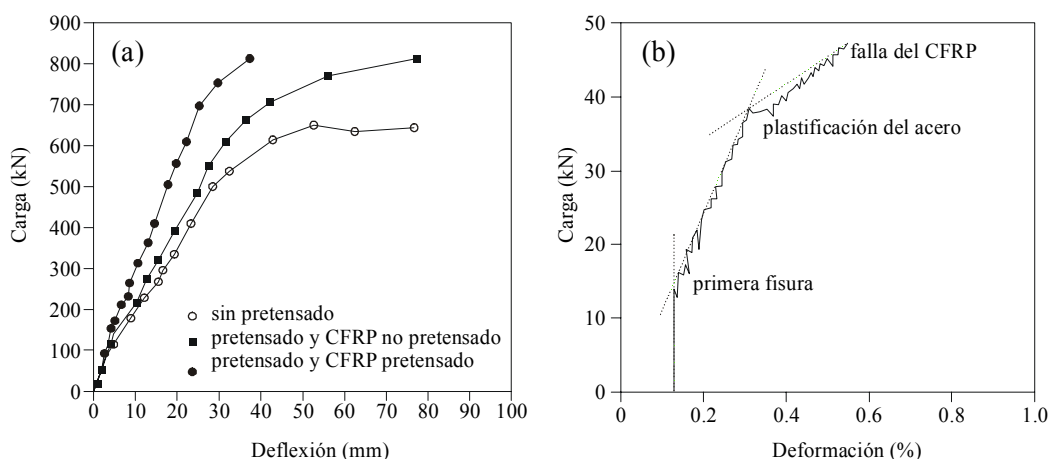


Figura 2.19. Resultados de vigas de hormigón reforzadas con FRP: (a) Incrementos de resistencia y rigidez [KAISER, 1989]; (b) Gráfica carga-deformación en sistemas de refuerzo de CFRP en vigas de hormigón. [MEIER & KAISER, 1991].

capacidad portante en puentes [NANNI, 1995] y en puentes pretensados con sección en cajón [FINCH et al., 1994].

Existe un amplio campo de investigación en vigas de hormigón armado reforzadas con FRP; y hace un par de años se publicó un estudio demostrando que el refuerzo de vigas T de hormigón con láminas de CFRP, puede incrementar la capacidad portante en un 22% además de aumentar su rigidez. Por otra parte, las láminas de CFRP pretensadas se pueden usar para incrementar la rigidez del sistema estructural [KAISER, 1989] Figura 2.19 (a). La tensión en el CFRP fue estudiada en diferentes vigas con el fin de exhibir tres distintas etapas del comportamiento de la viga bajo carga, correspondiendo a la sección sin fisurar, a la sección fisurada con el acero en su fase elástica y finalmente la sección fisurada con el acero en su fase plástica, terminando cuando el FRP fallaba a tracción [MEIER & KAISER, 1991] Figura 2.19 (b). Se obtuvieron incrementos en resistencia de más del 40 % e incrementos significativos en rigidez con el uso de FRP constituido por fibra de vidrio y Kevlar [ROSTASY et al., 1992; CHAJES et al., 1994, CHAJES et al., 1995^a], donde se observaron las fallas por cortante de las vigas de hormigón además de la rotura de la fibra.

En algunos casos la resistencia se incrementó más de un 245 %, y se consiguió a través del uso de grapas para prevenir el despegue de las láminas de FRP [SAADATMANESH & EHSANI, 1990]. Además se han utilizado láminas pretensadas de FRP, [TRANTAFILLOU et al., 1992]; se encontró que altos niveles de pretensado pueden ocasionar en el hormigón la falla por cortante en las zonas de anclaje. Estos estudios recientes, entre otros, han servido para varios sistemas de refuerzo y se han presentado los resultados bajo diferentes acciones de carga; así muchos investigadores han concluido que los procesos de falla y los criterios que los rigen necesitan un estudio más profundo.

2.3.3.1 Mecanismos de falla del refuerzo de FRP aplicado a hormigón armado

Se ha concluido que es necesario establecer los criterios de falla de los sistemas de refuerzo con láminas de FRP [ZIRABA et al., 1994]. Por esto, es preciso el entendimiento del comportamiento de estos sistemas. Se han presentado varios estudios de los diversos modos de falla observados en vigas reforzadas de hormigón [MEIER, 1995; CHAJES et al., 1994]; estos tipos de falla se pueden agrupar en 6 categorías

distintas (Figura 2.20) [BUYUKOZTURK & HEARING, 1998]: Plastificación del acero y rotura del FRP, aplastamiento del hormigón, falla por cortante, desprendimiento de la capa de hormigón, despegue del FRP y despegue por fisuración.

El criterio para establecer estos tipos de falla los determinan varios parámetros en el diseño de vigas reforzadas con FRP. Por ejemplo, se recomienda que se diseñen las secciones para que la falla de estos sistemas ocurra cuando el acero alcance el límite elástico, o sea, antes del aplastamiento del hormigón [MEIER, 1995].

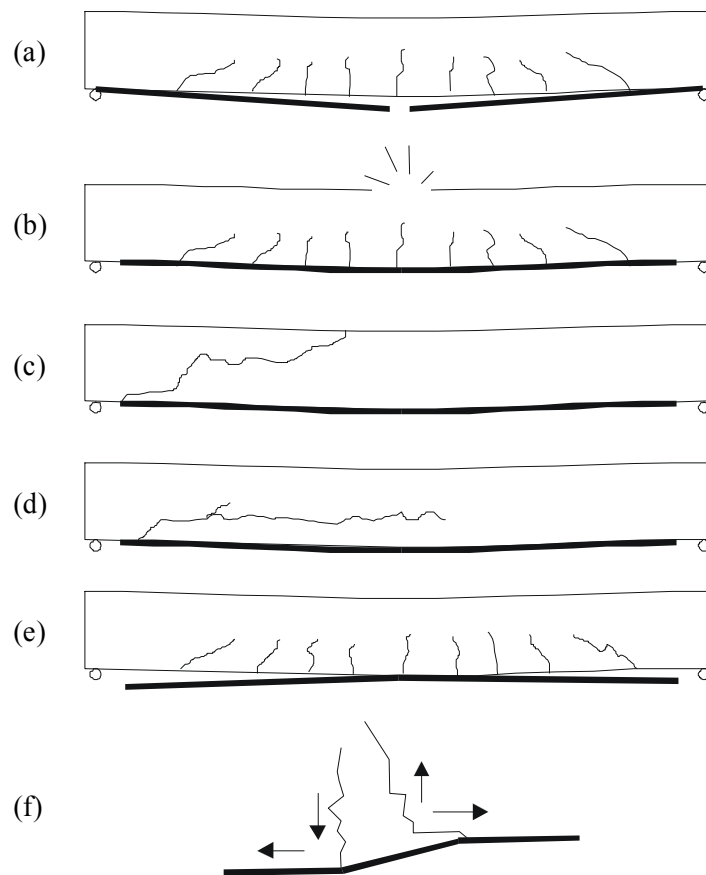


Figura 2.20. Mecanismos de falla en vigas de hormigón reforzadas con FRP: (a) Plastificación del acero y rotura del FRP; (b) Aplastamiento del hormigón; (c) Falla por cortante; (d) Desprendimiento de la capa de hormigón; (e) Despegue del FRP; (f) Despegue por fisuración. [BUYUKOZTURK & HEARING, 1998].

Esto se puede cumplir optimizando el trabajo del acero y el FRP, utilizando los métodos tradicionales de diseño. Hay otros tipos de falla, por cortante y por despegue de la fibra, que pueden depender de otros factores, tales como, la existencia de cercos de cortante, configuración del agrietamiento, longitud de las láminas de refuerzo y la rigidez relativa de adherencia [BUYUKOZTURK & HEARING, 1998].

Investigaciones recientes estudian la influencia de estos parámetros para determinar el comportamiento de las vigas reforzadas con este sistema [VICHIT-VADAKAN, 1997; MORIN, 1997].

En un programa experimental realizado en 1998 por Oral Buyukozturk y Brian Hearing se reforzaron y ensayaron varias vigas que habían sido llevadas a rotura previamente con este sistema de refuerzo (Figura 2.21). Primeramente se ensayaron los especímenes hasta conseguir una flecha en el centro de luz igual a $l / 240$, después fueron reforzadas utilizando dos tipos de FRP; el primero compuesto por una matriz con un 33% de fibras “E-glass/Nylon Plastic” (Grade 1600) y la segunda por una matriz con 70% “Carbon/Graphite Plastic” (T700). Los cercos de cortante se colocaron con dos separaciones distintas, 13 y 18cm, con el fin de ensayar diferentes capacidades de cortante en las vigas. Se utilizaron también dos tipos de resinas epóxicas; de bajo y alto módulo de elasticidad y longitudes de refuerzo de FRP de 70cm y 90cm. El espesor de las resinas aplicadas fue de 0.5mm a 2mm, debido a las distintas rugosidades en la superficie de las vigas. Todas estas variaciones ocasionaron que se produjeran una variedad en los mecanismos de falla, incluyendo:

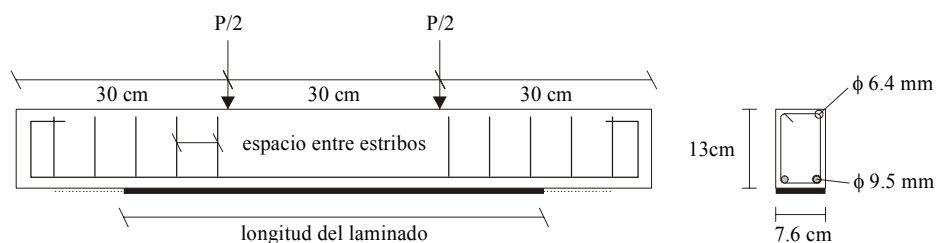


Figura 2.21. Especimen utilizado en el programa de ensayos [BUYUKOZTURK & HEARING 1998].

- Aplastamiento del hormigón a flexión.
- Falla por cortante de la viga.
- Despegue de la lámina de FRP.
- Desprendimiento de capas de hormigón al nivel del acero longitudinal.

En la figura 2.22 se muestran ejemplos de las curvas obtenidas en una gráfica carga-flecha, midiendo la deflexión en el centro de luz.

Las fallas por flexión en la sección reforzada incluyen la rotura de la fibra por agotamiento a tracción y aplastamiento del hormigón; ambas formas de rotura presentaron un comportamiento frágil y explosivo. Se registraron incrementos promedio de resistencia del 23%, aunque se tienen registros de más del 245% [SAADATMANESH & EHSANI, 1990; MEIER, 1992]. Las flechas en las vigas se redujeron comparadas con las obtenidas en las vigas sin reforzar, y la rigidez de la viga aumentó considerablemente. La resistencia a flexión y la rigidez de las vigas cuando se presentan este tipo de falla pueden ser pronosticadas utilizando las teorías de compatibilidad fuerza-deformación que se mostrarán más adelante. De cualquier modo, se observó que las fallas por flexión se presentaron solamente en las vigas con 90cm de longitud de lámina y 13cm entre cercos de cortante.

Las fallas por cortante se presentaron cuando la capacidad para resistir este esfuerzo en la sección fue excedida, antes de alcanzar su resistencia última a flexión. Se concluyó

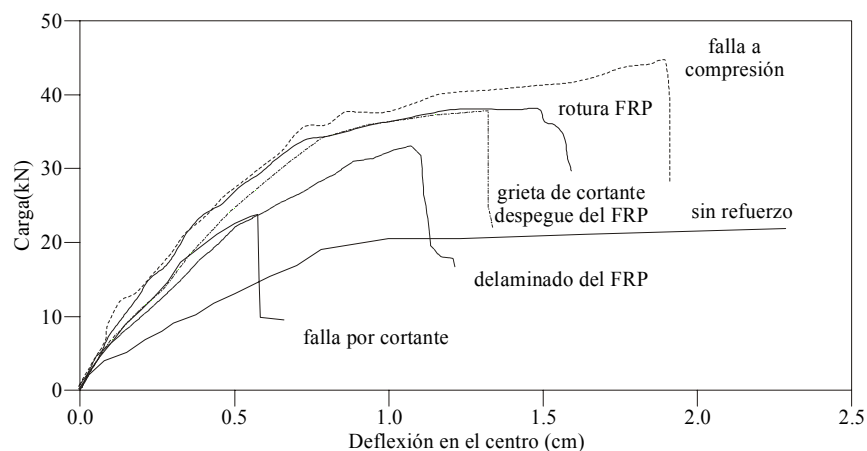


Figura 2.22. Gráfica carga-flecha [BUYUKOZTURK & HEARING 1998].

entonces, que el FRP colocado desde los extremos de la viga no tiene porque aumentar su capacidad a esfuerzo cortante. Estas fallas se presentaron en los especímenes con 18cm de separación entre cercos. Las fisuras típicas de cortante se extendieron desde el extremo de la fibra hasta el punto en donde se aplicó la carga, y se presentaron bajo cargas relativamente pequeñas, aunque conforme a la teoría de resistencia a cortante.

Se observaron también, otros tipos de falla en este sistema de refuerzo, involucrando una variedad de mecanismos de desprendimiento de las láminas de FRP, incluyendo: arrancamiento de capas de hormigón entre el FRP y el acero longitudinal y despegue del FRP del hormigón.

Estas fallas fueron típicas en las vigas con mayor refuerzo a cortante y tuvieron un comportamiento frágil. El desprendimiento de la capa inferior del hormigón ocurrió en las vigas que tenían láminas de 70cm de longitud, ocasionadas por las concentraciones de esfuerzos en las zonas de anclaje. El desprendimiento de la fibra se presentó en las vigas con láminas de FRP de 90cm, cuando se habían formado fisuras significativas por cortante. Este tipo de fallas han sido observadas por varios investigadores [RITCHIE et al., 1991; SAADATMANESH & EHSANI, 1989; SHARIF et al., 1994], se ha llegado a la conclusión de que la interfaz hormigón/FRP es susceptible a desplazamientos verticales relativos entre labios de fisuras [MEIER, 1992].

Se puede concluir que además de la falla a flexión se pueden presentar otra variedad de mecanismos de falla en el FRP, que pueden alterar el comportamiento y la ductilidad del sistema de refuerzo debido a efectos locales.

2.3.3.2 Análisis de los mecanismos de falla

Se ha invertido bastante tiempo en la investigación y el análisis de los diferentes mecanismos de falla en las vigas de hormigón reforzadas con láminas de FRP.

El análisis se considera usualmente limitado, ya que los datos son tomados de elementos estructurales de hormigón simples, con una sección rectangular y con refuerzo de FRP en la cara inferior del elemento; aunque en principio, se pueden aplicar aproximaciones similares para otras configuraciones geométricas más complejas.

a. *Falla por flexión.* Se han realizado muchas investigaciones analizando el comportamiento y resistencia a flexión de secciones compuestas [KAISER, 1989; TRIANTAFILLOU & DESKOVIC, 1991; KARAM, 1992 entre otros muchos].

Muchos de estos estudios han concluido que es aplicable el equilibrio de la sección en el análisis de falla a tracción de la fibra, tomando en cuenta el momento último resistido por la sección reforzada:

$$\frac{M_u}{b \cdot d^2 f'_c} = \frac{f_y}{f'_c} \rho_s \left(1 - \frac{\bar{y}}{d}\right) + \frac{E_{f_c} \cdot \varepsilon'_{f_c}}{f'_c} \rho_{f_c} \left(\frac{h_p}{d} - \frac{\bar{y}}{d}\right) \quad (2.9)$$

donde:

\bar{y} = Es la distancia desde el centroide de fuerzas a la fibra superior.

h_p = Profundidad hasta el FRP.

ε'_{f_c} = Deformación a rotura del FRP.

E_{f_c} = Módulo de elasticidad del FRP.

M_u = Momento flector último.

b = Ancho de la sección.

d = Canto útil.

f'_c = Resistencia del hormigón a compresión.

f_y = Límite elástico del acero.

ρ_s = Porcentaje de acero en la sección.

ρ_{f_c} = Porcentaje de FRP en la sección.

Usando argumentos similares, estos estudios han concluido que la sección fallará a compresión cuando ésta esté sobre-reforzada, es decir, cuando el acero y/o el FRP sean tales que la deformación en el hormigón exceda de 0.003 y el momento último estará dado por:

$$M_u = 0.7225 \frac{c}{d} \left(\frac{h_p}{d} - 0.425 \frac{c}{d} \right) - 0.003 \frac{\left(1 - \frac{c}{d} \right) E_s}{\frac{c}{d} f'_c} \rho_s \left(\frac{h_p}{d} - 1 \right) \quad (2.9)$$

donde c es la profundidad del eje neutro.

b. *Falla por cortante.* Ha sido propuesto que la resistencia al esfuerzo cortante de las vigas reforzadas con FRP en la cara inferior, no es alterada significativamente en comparación con la resistencia antes del refuerzo de FRP [PLEVRIS, et al. 1995; VICHIT-VADAKAN, 1997].

Por esto, se han presentado técnicas tradicionales de análisis basadas en la teoría de cortante convencional del hormigón [ZIRABA et al., 1994].

$$V_{up} = \frac{1}{6} \left(\sqrt{f'_c} + 100 \rho_s \right) \cdot b \cdot d + k \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s} \quad (2.10)$$

donde:

V_{up} = Esfuerzo cortante último.

A_v = Área de la sección de la armadura transversal.

s = Separación entre planos de armaduras transversales.

El coeficiente k depende de parámetros asociados con el arrancamiento del recubrimiento del hormigón [ROBERTS, 1989]. Este análisis no considera un nuevo refuerzo a cortante [BERSET, 1992; SHARIF et al., 1994; CHAJES et al., 1995^b], donde es necesario desarrollar métodos nuevos para el análisis de estos esquemas de falla.

c. *Falla por desprendimiento.* La aplicación de láminas de FRP a la superficie de vigas de hormigón introduce una transferencia de tensiones tangenciales a la interfaz hormigón/epoxi [BUYUKOZTURK & HEARING, 1998]. En los extremos de las láminas de FRP existe un cambio de rigidez y una discontinuidad en la curvatura de la

viga que crea una concentración de tensiones en el hormigón, casi siempre iniciando una fisuración que puede facilitar el despegue de la fibra. Las fisuras se presentan en la zona de anclaje y pueden seguir dos caminos: a través de la interfaz hormigón/fibra o a lo largo de las barras de refuerzo longitudinales. Estos mecanismos de falla están casi siempre relacionados con una falla tracción-cortante en el hormigón, originando el arrancamiento de la capa de hormigón desde la armadura longitudinal, o el descascaramiento debido al desplazamiento de los labios de la fisura, originando el desprendimiento del FRP por la interfaz hormigón/fibra.

La falla tracción-cortante en el hormigón, se inicia en el extremo de la lámina de FRP anunciando casi siempre la falla por cortante de la viga, el desprendimiento del FRP o el arrancamiento del hormigón desde la armadura longitudinal.

Estos complejos mecanismos de falla han sido ya estudiados [KAISER, 1989; ARDUINI et al., 1994; VICHIT-VADAKAN, 1997], sin embargo, no se ha desarrollado hasta la fecha ninguna técnica analítica simplificada que sea eficiente. La transmisión del cortante entre el hormigón y la hoja de FRP, puede ser expresada a través de una ecuación diferencial de segundo orden [VICHIT-VADAKAN, 1997].

$$E_{f_c} \frac{\delta^2 u_1}{\delta x^2} = - \frac{G_a (u_b - u_l)}{t_l \cdot t_a} \quad (2.11)$$

donde:

E_{f_c} = El módulo de elasticidad del FRP.

G_a = Módulo de cortante del epoxi.

t_l = Espesor de la lámina de FRP.

t_a = Espesor del epoxi.

u_b = Desplazamiento longitudinal de la viga.

u_l = Desplazamiento longitudinal de la lámina de FRP.

La relación momento-curvatura establece los desplazamientos de la viga y puede ser establecida por:

$$u_b = \int_0^x \frac{M \cdot y}{E_c I} \cdot dx \quad (2.12)$$

donde:

M = El momento actuante.

y = Distancia de la fibra al eje neutro.

E_c = El módulo de elasticidad del hormigón.

I = El momento de inercia de la sección homogeneizada.

Las dos ecuaciones anteriores se pueden usar en un proceso iterativo para poder calcular la transferencia de las tensiones tangenciales entre la superficie de la viga y la lámina de FRP. La figura 2.23 muestra la concentración de tensiones tangenciales en los extremos del FRP para variaciones de longitud utilizando este método. Estas técnicas son útiles para estudiar cómo puede influir la concentración de tensiones en los extremos del FRP y el agrietamiento en el comportamiento de falla de la viga.

El desprendimiento del FRP se puede iniciar desde los extremos del FRP o desde grietas existentes en el hormigón (Figura 2.24). Las grietas formadas por flexión, localizadas en

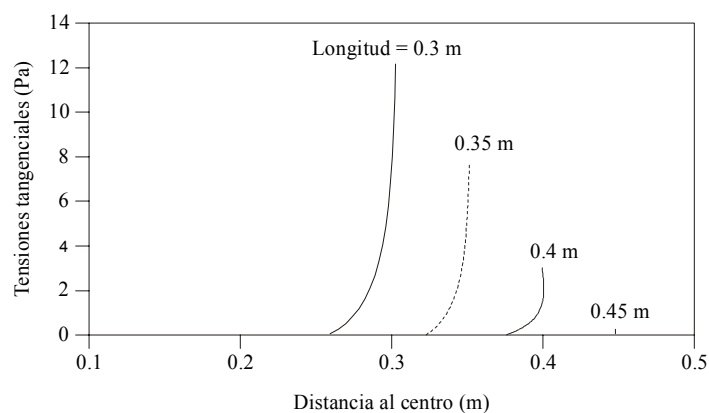


Figura 2.23. Distribución de la transferencia de las tensiones tangenciales [VICHIT-VADAKAN, 1997].

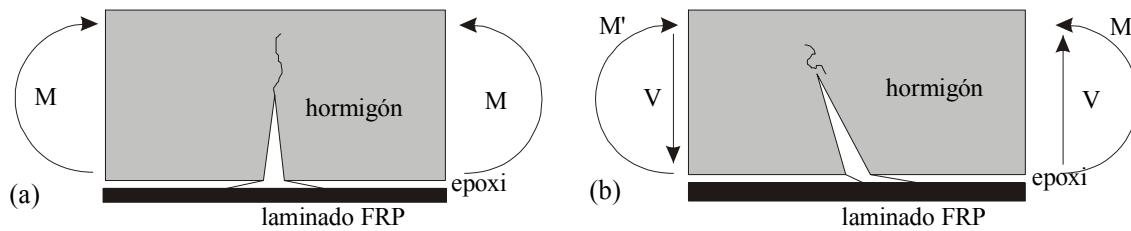


Figura 2.24. Despegue del FRP: (a) Bajo momento flector; (b) Bajo momento flector y cortante. [BUYUKOZTURK & HEARING 1998].

regiones de la viga sometidas a altos momentos flectores, pueden originar el despegue de la fibra debido al esfuerzo rasante en la interfaz hormigón/fibra. Los labios de las grietas localizados en las zonas de la viga sometidas a esfuerzos tanto de flexión como de cortante, pueden ser precursores de la fisuración a lo largo de la interfaz. Los estudios de adherencia [CHAJES et al., 1996], y de la resistencia interfacial de fisuración [KARBHARI et al., 1997], han sido iniciados usando varias técnicas, tales como, “*single-lap shear*” y probetas de arrancamiento con variación en el ángulo de incidencia.

2.3.3.3 Adherencia entre el FRP y el hormigón

El enlace del refuerzo externo de FRP al substrato de hormigón es de importancia crítica para la eficiencia de esta técnica de refuerzo, puesto que es el medio para garantizar la transferencia de tensiones entre el hormigón y el FRP para desarrollar así la acción compuesta. La determinación del valor de la resistencia de adherencia es indispensable para comprender los mecanismos de transmisión de tensiones en una junta.

En la tabla 2.10 y 2.11 y 2.12 se muestra un resumen ilustrado con los modelos experimentales para la caracterización de la adherencia, haciendo referencia de los principales trabajos de investigación relacionados con este tema, así como la información obtenida a partir de los ensayos realizados [JUVANDES, 1999].

En la tabla 2.13 se muestran los métodos utilizados por Japón para realizar la caracterización de la unión hormigón/adhesivo/FRP, en sistemas flexibles (hojas, tejidos) y curados in situ, identificando tres tipos de pruebas: ensayos a flexión, ensayos a cortante y ensayos a tracción directa [JCI TC952, 1998].

Tabla 2.10. Ensayos para la caracterización de la interfaz en juntas dobles [JUVANDES, 1999].

Modelos de ensayos	Materiales	Autores
	Chapas de acero	Volkerson (1983) Ranisch (1982)
<p data-bbox="379 770 592 801">Tracción - Tracción</p>	Laminados de FRP Chapas de acero	Kaiser (1989) Rodrigues (1993) Holzenkämpfer (1994) Rostásy (1996, 1997, 1998) Neubauer et al. (1997) Nsambu (1997)
<p data-bbox="379 1160 632 1191">Tracción - Compresión</p>	Mantas de CFRP Chapas de acero	Van Gemert (1980) Brosens et al. (1997, 1999)
<p data-bbox="400 1653 612 1682">Tracción - Tracción</p>		

Tabla 2.11. Ensayos para la caracterización de la interfaz en juntas simples [JUVANDES, 1999]

Modelos de ensayos	Materiales	Autores
	<p>Laminados de CFRP Chapas de acero</p>	<p>Täljsten (1994) Poulsen et al. (1996) Poulsen et al. (1997) Ladner et al. (1981)</p>
Tracción - Compresión		
	<p>Laminados de CFRP Mantas de CFRP Tejidos de CFRP</p>	<p>Chajes et al. (1995) Chajes et al. (1996)</p>
Tracción - Compresión		
	<p>Mantas de FRP</p>	<p>Hamelin et al. (1995) Varastehpour et al. (1995, 1996) Varastehpour et al. (1997)</p>
	<p>Adhesivo</p>	<p>Arduini et al. (1997) Poulsen et al. (1997)</p>

Tabla 2.11 (Continuación). Ensayos para la caracterización de la interfaz en juntas simples [JUVANDES, 1999]

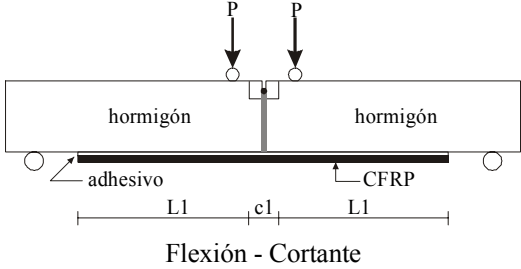
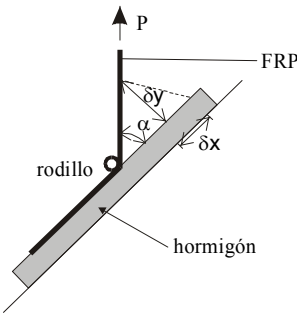
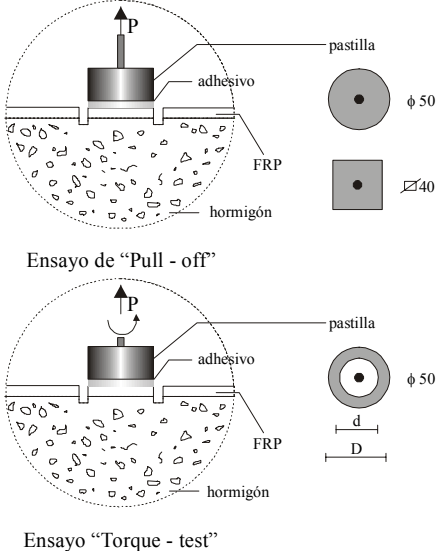
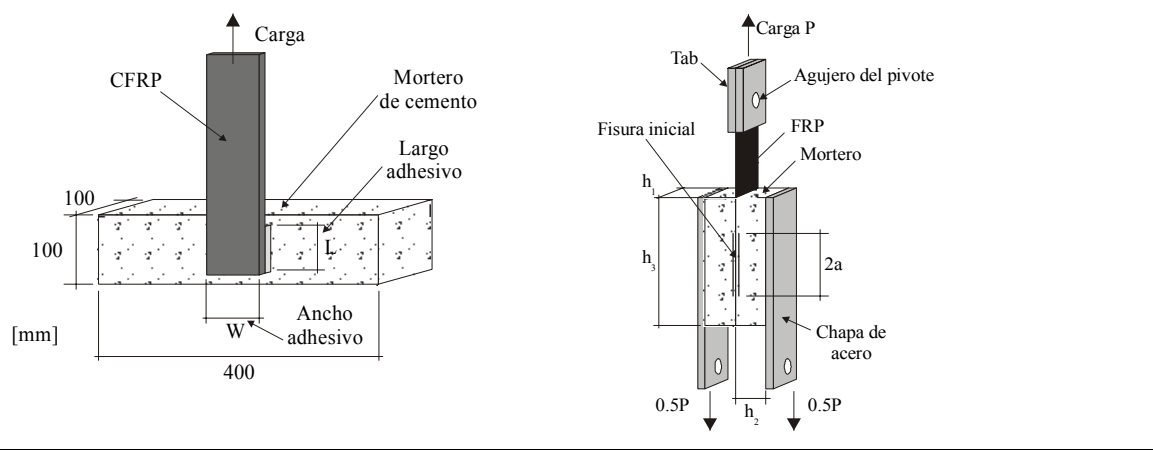
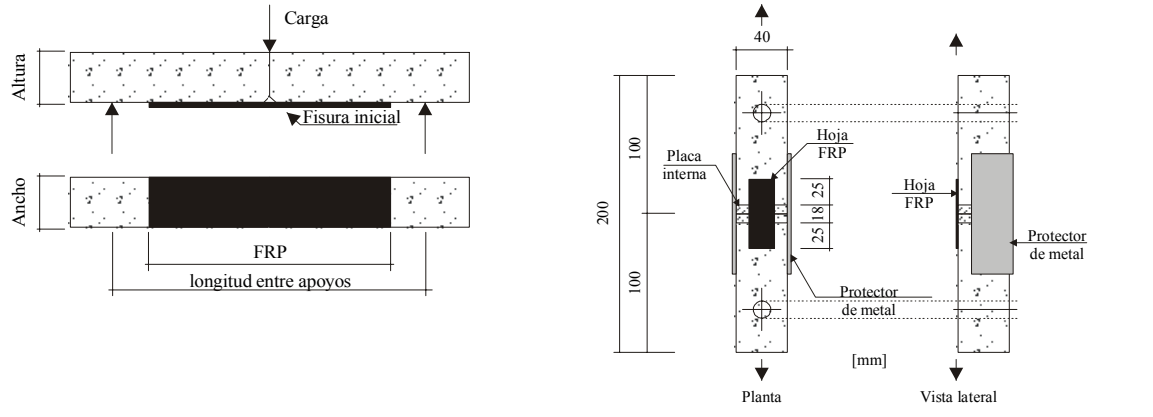
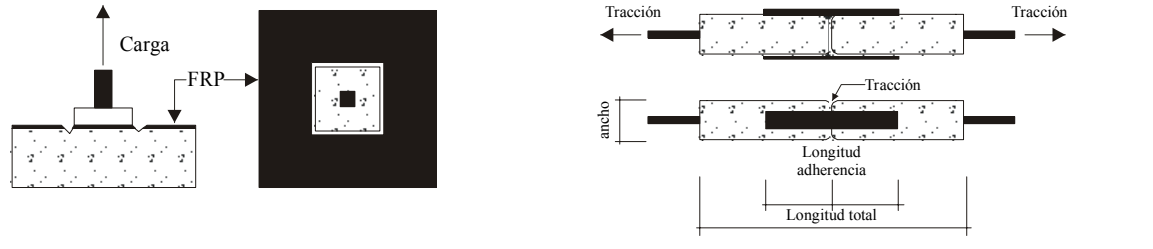
Modelos de ensayos	Materiales	Autores
 <p>Flexión - Cortante</p>	<p>Laminados de FRP Mantas de FRP</p>	<p>Van Gemert (1980) Horiguchi et al. (1997) Juvandes et al. (1998)</p>
	<p>Mantas de FRP Tejidos de FRP</p>	<p>Karbhari et al. (1997)</p>
 <p>Ensayo de "Pull - off"</p> <p>Ensayo "Torque - test"</p>	<p>Adhesivos Laminados de FRP Mantas de FRP</p>	<p>Van Gemert (1980) Petersen et al. (1997) Emmons et al. (1997) Juvandes et al. (1998)</p>

Tabla 2.12 Ensayos de adherencia [JCI TC952, 1998]

Interfaz Hormigón / FRP



Juntas entre FRP

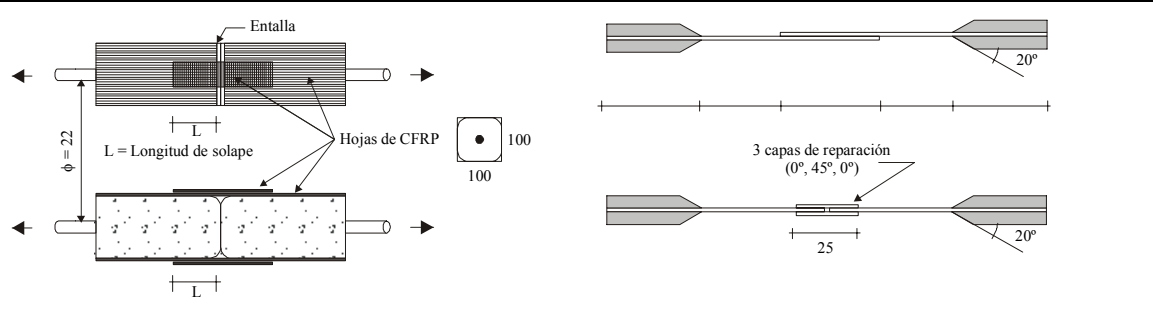


Tabla 2.13. Algunos criterios para determinar la resistencia de adherencia en juntas [JUVANDES, 1999].

Autores	Condiciones del hormigón	Resistencia de adherencia (τ_{max} , τ_{med})
Van Gemert (1980)	Estado I	$\tau_{max} = f_{ctm,p}$
Brosens et al. (1997)	Estado II	$\tau_{max} = f_{ctk}$
Brosens et al. (1999)	Estado I y II	$\tau_{max} = K_b 1.8 f_{ctm}$
Peterson et al. (1997)	Superficie limpia	$\tau_{max} = \tau_{c max} = \frac{16 \cdot D \cdot M_t}{\pi(D^4 - d^4)} = \text{cohesión}$ <p>donde: $D = 75 \text{ mm}$, $d = 56 \text{ mm}$ $M_t = \text{momento}$</p>
Ranisch (1982)	Hormigones comunes	$\tau_{max} = \frac{8 f_{ctm,p} - 3}{1.8}$
Kaiser (1989) Deskovic (1991) Deuring (1993)	Hormigón B35/25 (SIA 162 de 1989)	$\tau_{max} \cong 8 \text{ MPa}$ (criterio Ranisch)
Arduini et al. (1997)	$f_{cm} = 36 \text{ MPa}$ (cilindros)	$\tau_{max} \cong 5.4 \text{ MPa}$ (criterio de Moh-Columb)
Varastehpour et al. (1995, 1996)	$f_{cm} = 43.5 \text{ MPa}$ $f_{ctm} = 6.35 \text{ MPa}$	$\tau_{med} = 5.4 \text{ MPa} = \text{cohesión}$ (ensayos a cortante simples) $\tau_{med} = 4.2 \text{ MPa}$ (ensayos a flexión)
Chajes et al. (1996)	$f_{ctm} = 47 \text{ MPa}$	$\tau_{med} = 4.9 \text{ MPa} - 5.5 \text{ MPa}$ (ensayos a cortante simples)
Nsambu (1997)	$f_{cm,28} = 34.8 \text{ MPa}$ $f_{ctm,28} = 2.9 \text{ MPa}$	$\tau_{med} = 0.8 \text{ MPa} - 1.3 \text{ MPa}$ (ensayos a cortante dobles)
JCI TC952 (1998)	Hormigones comunes y juntas efectivas con extensiones de 60 a 90 mm	$\tau_{med} = 2 \text{ MPa} - 5 \text{ MPa}$ (ensayos a cortante dobles)

τ_{max} , τ_{med} valores de adherencia máximo y medio definidos para las leyes constitutivas de los materiales;
 $f_{ctm,p}$ valor medio de resistencia a tracción de la superficie del hormigón (ensayos de "pull off").

A continuación se comentan algunos de los principales trabajos de investigación relacionados con este tema:

a. Chajes et al. (1996) estudió la adherencia y el mecanismo de fuerzas de transferencia en laminados de materiales compuestos adheridos al hormigón. En primer lugar se realizó una serie de ensayos para investigar la influencia de la preparación superficial, tipo de adhesivo y la resistencia a compresión del hormigón sobre la resistencia de adherencia. En segundo lugar, se realizó una serie de ensayos para estudiar la transferencia de tensiones del laminado al hormigón. Se observaron dos mecanismos de falla. Por un lado la falla por agotamiento tangencial del hormigón por debajo de la superficie del mismo y por otro lado de tipo cohesivo que dependía del tipo de adhesivo.

b. Yoshizawa et al. (1996) realizó un estudio sobre el efecto del tipo de preparación superficial del hormigón sobre la adherencia de hojas de CFRP. El espécimen usado en estas pruebas era un prisma de hormigón con dos hojas de CFRP adheridas en lados opuestos. El espécimen fue ensayado a tracción, originando tensiones tangenciales directas en el CFRP. La preparación superficie del hormigón se realizó mediante hidrodemolición y chorro de arena. Se encontró que la técnica de hidrodemolición incrementaba al doble la capacidad de carga del espécimen en relación a la técnica de chorro de arena.

c. Otro grupo de investigadores estudió la relación existente entre la resistencia de adherencia y la calidad del hormigón [HORIGUCHI & SAEKI, 1997]. Se investigaron tres diferentes métodos de ensayo utilizando hojas de CFRP; a flexión, a cortante y a tracción directa en hormigones con resistencias a compresión comprendidas entre 10 y 50MPa. El ensayo a tracción directa produjo la resistencia de adherencia mayor, seguida por el ensayo a flexión y por último el de cortante. Se observaron tres mecanismos de falla: cortante del hormigón, delaminación del FRP y rotura del FRP. Cuando la resistencia a compresión del hormigón era baja (menos de 25.3MPa), la falla se producía en el hormigón. La delaminación ocurrió cuando la resistencia a compresión del hormigón era alta o cuando se realizó el ensayo a cortante. La rotura del FRP se observó en los ensayos a flexión con hormigón de alta resistencia (50MPa). La resistencia de adherencia aumentó en relación a la resistencia a compresión del

hormigón. La longitud de anclaje de la hoja del CFRP tuvo un efecto mínimo en la carga última.

d. Brosens y Van Gemert (1997) realizaron ensayos a cortante en dos prismas de hormigón conectados con 3 capas del CFRP en dos lados opuestos. Los resultados demostraron que el aumento de la longitud de anclaje aumenta la carga última, en contraposición a los resultados de otros investigadores. Sin embargo, encontraron que la influencia de la longitud de anclaje disminuye en longitudes mayores. Concluyeron que para propósitos de cálculo puede tomarse en cuenta una distribución lineal de las tensiones de adherencia en la hoja de FRP.

e. Otro trabajo de investigación en relación al mecanismo de adherencia de hojas del CFRP fue conducido por Maeda et al. (1997). Las variables que se tomaron en cuenta fueron: la longitud de anclaje, número de capas de FRP, y tipo de hoja de FRP. Los resultados de las pruebas demostraron que, cuando la rigidez del CFRP aumenta, la carga última se incrementa. Para las longitudes de anclaje de alrededor de 100 milímetros, la carga última no cambió, implicando la existencia de una longitud de anclaje eficaz.

f. Xie y Kharbari (1997) utilizaron un ensayo para caracterizar la resistencia de adherencia entre el CFRP y el substrato de hormigón. Se midió la energía de fractura de la interfaz con varios ángulos de aplicación y distintos porcentajes de FRP. Cuando el ángulo se incrementaba, o el porcentaje de FRP disminuía, la energía de fractura en el interfaz aumentaba. La mayoría de las fallas sucedieron como fallas cohesivas en el pegamento. Se realizó un análisis numérico para evaluar la energía de deformación para varias trayectorias de la propagación de la grieta.

g. Täljsten (1994, 1997) realizó ensayos de cortante en prismas de hormigón con placas de acero y CFRP adheridas. Los resultados fueron comparados con la teoría de Volkersen para solapes y la comparación demostró que la teoría puede predecir la tensión tangencial en la unión del solape bastante bien para niveles moderados de carga. También se observó que una longitud de anclaje superior a la crítica no contribuye a incrementar la carga última.

h. Bizindavyi y Neale (1999) realizaron una investigación experimental y analítica sobre longitudes de transferencia y fuerzas de adherencia en laminados de FRP adheridos al hormigón. A partir de los ensayos experimentales se observó que para una sola capa de GFRP de 25 milímetros de ancho en juntas de hormigón, una longitud de anclaje de 160 milímetros era suficiente para desarrollar la capacidad total a tracción del laminado. Para dos capas de GFRP de 25 milímetros de ancho, una longitud de anclaje de 260 milímetros era suficiente para desarrollar la capacidad total a tracción del laminado. En el caso de 1 y 2 capas de CFRP de 25 milímetros de ancho, longitudes de anclaje de 80 y 220 milímetros, respectivamente, eran suficientes para desarrollar la capacidad total a tracción de los laminados. Se determinaron las expresiones empíricas para calcular las longitudes de transferencia en función de niveles relativos de carga. Se demostró que la longitud inicial de transferencia está en función de la longitud de anclaje total y que el excedente en la longitud de anclaje permite la transferencia de las cargas que excedan los niveles de las cargas de servicio.

i. Volnyy et al. (1999) investigó la fuerza de adherencia entre el hormigón y placas de CFRP que se utilizarían como conexiones en paredes de hormigón prefabricado. La falla ocurrió en todos los especímenes debido los mecanismos siguientes: rotura del CFRP, delaminación del CFRP y falla por cortante del hormigón. La distribución de tensiones a lo largo del FRP parecía ser aproximadamente lineal en un principio, e ir asintótica a cero después de la longitud de anclaje eficaz de la conexión.

Los ensayos a corte demuestran que las tensiones de tracción (en el laminado) y las tensiones tangenciales (en la interfaz) se distribuyen uniformemente a lo largo del FRP.

Antes de que el hormigón fisure, las tensiones máximas se localizan en el extremo del FRP solicitado a tracción extendiéndose hasta una longitud determinada (l_t), como se muestra en la figura 2.25 (a).

Cuando la fuerza de tracción del FRP es transferida al hormigón, no existen prácticamente tensiones de corte a lo largo de la interfaz hormigón/FRP, sin embargo una vez alcanzada la resistencia al corte del hormigón se inicia una fisura longitudinal a lo largo de la interfaz, por lo que el diagrama de tensiones se transfiere a la zona

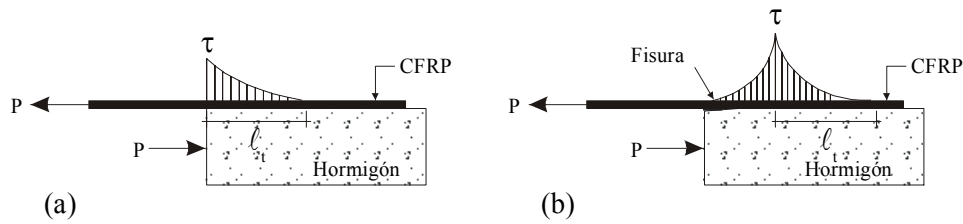


Figura 2.25. Distribución de tensiones tangenciales en una junta; (a) antes de fisurar, (b) después de fisurar [BROSENS et al., 1997].

próxima no fisurada, a pesar de que se pueda admitir alguna contribución del hormigón entre fisuras transversales (figura 2.25 (b)). A partir de este momento, el aumento de tracción en el FRP no tiene ningún significado, siendo el diagrama arrastrado hacia el extremo opuesto de la junta hasta que se produzca el desprendimiento brusco del FRP. Este comportamiento se ha confirmado experimentalmente por varios autores [TÄLSJEN, 1994; CHAJES et al., 1996; ROSTASY et al., 1997; MAEDA et al., 1997], concluyendo que existe una longitud crítica de adherencia ($l_{t,max}$), que una vez que se excede, la fuerza máxima de falla de la junta se mantendrá constante.

En la tabla 2.13 se muestran algunos criterios para determinar el valor de la resistencia de adherencia de la interfaz hormigón/adhesivo/FRP [JUVANDES, 1999]. Como se puede observar, existen diferencias significativas entre algunos de los criterios utilizados por los autores, esto se debe principalmente a la gran diversidad entre sistemas de FRP, además de las variables que entran en juego, como: el tipo de estructura, las características mecánicas de la resina, la preparación de la superficie, entre otras.