

49

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO



FACULTAD DE INGENIERIA

“COMPUESTOS DE POLÍMEROS  
REFORZADOS CON FIBRAS (FRP)  
EN LA INGENIERÍA CIVIL”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL  
P R E S E N T A :  
ARTURO GAYTAN COVARRUBIAS

DIRECTOR DE TESIS:  
M.S.C.E. CARLOS A. GOMEZ TOLEDO



MEXICO, D.F.

2002

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo excepcional.

NOMBRE: Arturo Cruz

COPIAS: COPIAS

FECHA: 22/09/02

SERMA: [Signature]

DE LA BIBLIOTECA





SECRETARÍA NACIONAL  
DE EDUCACIÓN PÚBLICA

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/ 130/02

Señor

**ARTURO GAYTÁN COVARRUBIAS**

Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. CARLOS A. GÓMEZ TOLEDO**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tema de tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"COMPUESTOS DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS (FRP) EN LA INGENIERÍA CIVIL"**

- I. INTRODUCCIÓN
- II. COMPUESTOS FRP
- III. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS COMPUESTOS FRP
- IV. APLICACIONES Y USOS
- V. DURABILIDAD
- VI. ANÁLISIS DEL COSTO DEL CICLO DE VIDA
- VII. RECOMENDACIONES DE DISEÑO
- VIII. FRP EN MÉXICO
- VIII. CONCLUSIONES

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

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

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cd. Universitaria a 30 de agosto de 2002.

EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg

*A Dios y a mi Familia*

**“Compuestos de Polímeros Reforzados con Fibras (FRP) en la Ingeniería Civil”**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Glosario .....                                             | 1  |
| Introducción .....                                         | 12 |
| <b>Capítulo 1, “Compuestos FRP”</b>                        |    |
| 1.1 Antecedentes .....                                     | 14 |
| 1.2 Perspectiva Histórica .....                            | 15 |
| 1.3 Estadísticas de la Industria de los Compuestos .....   | 17 |
| 1.4 Reglamentación                                         |    |
| 1.4.1 Comités Técnicos .....                               | 18 |
| 1.4.2 Organizaciones .....                                 | 19 |
| 1.4.3 Criterios de Desarrollo .....                        | 20 |
| 1.4.4 Transmisión de la Tecnología .....                   | 21 |
| 1.5 Materiales Compuestos                                  |    |
| 1.5.1 Definición .....                                     | 22 |
| 1.5.2 Beneficios .....                                     | 23 |
| 1.5.3 Composición .....                                    | 24 |
| 1.5.4 Refuerzos .....                                      | 25 |
| 1.5.4.1 Fibras de Vidrio .....                             | 25 |
| 1.5.4.2 Fibras de Carbono .....                            | 26 |
| 1.5.4.3 Fibras de Aramida (Poliaramidas) .....             | 26 |
| 1.6 Formas de Refuerzo .....                               | 27 |
| 1.6.1 Hilos Itinerantes .....                              | 27 |
| 1.6.2 Colchonetas .....                                    | 28 |
| 1.6.3 Telas trenzadas, tejidas y cosidas .....             | 28 |
| 1.6.4 Tejido 3D .....                                      | 30 |
| 1.6.5 Refuerzo Unidireccional .....                        | 31 |
| 1.6.6 Prepreg .....                                        | 32 |
| 1.7 Resinas .....                                          | 33 |
| 1.7.1 Resina Poliéster .....                               | 33 |
| 1.7.2 Resinas Epóxicas .....                               | 34 |
| 1.7.3 Resinas Vinitéster .....                             | 35 |
| 1.7.4 Resinas Fenólicas .....                              | 35 |
| 1.7.5 Poliuretano .....                                    | 35 |
| 1.8 Materiales de Relleno o Cargas .....                   | 36 |
| 1.8.1 Tipos de materiales de relleno o cargas .....        | 36 |
| 1.8.2 Uso de materiales de relleno en los compuestos ..... | 37 |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 1.8.3 Tratamientos de la superficie .....                 | 38 |
| 1.9 Aditivos y Modificadores                              |    |
| 1.9.1 Función de los Aditivos .....                       | 38 |
| 1.9.2 Inhibidores, promotores y catalizadores .....       | 40 |
| 1.9.3 Colorantes .....                                    | 40 |
| 1.9.4 Agentes Desmoldantes .....                          | 40 |
| 1.9.5 Agentes Trioxotrópicos .....                        | 40 |
| 1.10 Materiales Centrales para Estructuras Sándwich ..... | 41 |
| 1.11 Adhesivos .....                                      | 42 |
| 1.12 Recubrimientos Gel .....                             | 42 |
| 1.13 Procesos de Manufactura .....                        | 43 |
| 1.13.1 Pultrusión .....                                   | 44 |
| 1.13.2 Moldeo por transferencia de resina (RTM) .....     | 45 |
| 1.13.3 Moldeo a Mano .....                                | 47 |
| 1.13.4 Moldeo por compresión .....                        | 47 |
| 1.13.5 Moldeo por rotación de filamentos .....            | 48 |
| <br>                                                      |    |
| <b>Capítulo 2, “Propiedades de los Compuestos FRP”</b>    |    |
| 2.1 Propiedades de los materiales constituyentes .....    | 49 |
| 2.1.1 Fibras de Refuerzo .....                            | 49 |
| 2.1.1.1 Fibra de vidrio .....                             | 50 |
| 2.1.1.2 Fibra de carbono .....                            | 50 |
| 2.1.1.3 Fibra de aramida .....                            | 51 |
| 2.1.1.4 Híbridos .....                                    | 52 |
| 2.1.2 Resinas .....                                       | 53 |
| 2.2 Barras y Tendones FRP                                 |    |
| 2.2.1 Propiedades Físicas                                 |    |
| 2.2.1.1 Densidad .....                                    | 54 |
| 2.2.1.2 Expansión Térmica .....                           | 55 |
| 2.2.2 Propiedades Mecánicas                               |    |
| 2.2.2.1 Resistencia a Tensión .....                       | 55 |
| 2.2.2.2 Modulo de Elasticidad a Tensión .....             | 58 |
| 2.2.2.3 Resistencia a la compresion .....                 | 58 |
| 2.2.2.4 Modulo de Elasticidad a Compresión .....          | 59 |
| 2.2.2.5 Resistencia al Cortante .....                     | 59 |
| 2.2.2.6 Fluencia y Ruptura a la Fluencia .....            | 59 |
| 2.2.2.7 Fatiga .....                                      | 59 |
| 2.2.2.8 Capacidad de Adhesión .....                       | 60 |
| 2.2.2.9 Dobleces, Estribos y Formas .....                 | 62 |
| 2.2.2.10 Superficie .....                                 | 62 |
| 2.2.2.11 Durabilidad .....                                | 63 |
| 2.3 Láminas y Tiras FRP .....                             | 64 |
| 2.3.1 Propiedades Físicas y Mecánicas .....               | 65 |
| 2.4 Factores que afectan las propiedades mecánicas .....  | 70 |
| 2.3.1 Humedad .....                                       | 70 |
| 2.3.2 Fuego y Temperatura .....                           | 70 |
| 2.3.3 Rayos Ultravioleta .....                            | 71 |
| 2.3.4 Corrosion .....                                     | 71 |
| 2.5 Métodos de Prueba .....                               | 71 |



|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Capítulo 4, “Durabilidad”</b> .....                               | <b>114</b> |
| 4.1 Definición .....                                                 | 115        |
| 4.2 Materiales constituyentes .....                                  | 116        |
| 4.3 Efectos ambientales que afectan la durabilidad .....             | 116        |
| 4.3.1 Absorción de Humedad (Agua) .....                              | 116        |
| 4.3.2 Soluciones Alcalinas .....                                     | 117        |
| 4.3.3 Soluciones químicas agresivas .....                            | 117        |
| 4.3.4 Exposición al Congelamiento y Descongelamiento .....           | 117        |
| 4.3.5 Ciclo Térmico y Temperatura (Arriba de Cero) .....             | 118        |
| 4.3.6 Fluencia y Relajación .....                                    | 118        |
| 4.3.7 Carga de Fatiga .....                                          | 119        |
| 4.3.8 Radiación Ultravioleta (UV) .....                              | 119        |
| 4.3.9 Exposición al Fuego y Altas Temperaturas .....                 | 119        |
| 4.3.10 Impacto .....                                                 | 119        |
| <b>Capítulo 5, “Análisis de Costos del Ciclo de Vida”</b> .....      | <b>123</b> |
| 5.1 Modelo del Costo del Ciclo de Vida .....                         | 123        |
| 5.2 Método de análisis del costo de vida .....                       | 125        |
| 5.2.1 Esquema de Clasificación de Costos .....                       | 126        |
| 5.2.2 Costos de Introducción de Nuevas Tecnologías .....             | 128        |
| 5.3 Beneficios del Costo de Vida Útil de los Materiales FRP .....    | 129        |
| 5.4 Formulas .....                                                   | 130        |
| 5.5 Costos de usuario .....                                          | 131        |
| 5.6 Variables del Costo de Vida .....                                |            |
| 5.6.1 Periodo de Analisis .....                                      | 133        |
| 5.6.2 Tasa de Interes .....                                          | 133        |
| 5.6.3 Tasa de Inflación .....                                        | 133        |
| 5.6.4 Costos unitarios de construcción y rehabilitación .....        | 133        |
| 5.6.5 Ambito y Frecuencia de la Rehabilitación .....                 | 133        |
| 5.6.6 Costos de Retraso al Conductor .....                           | 134        |
| 5.6.7 Tasa Normal de Accidentes .....                                | 134        |
| 5.6.8 Tasa de Accidentes en Carretera .....                          | 134        |
| 5.6.9 Costo por Accidente .....                                      | 134        |
| 5.7 Ejemplo del método del costo del ciclo de vida .....             | 136        |
| <b>Capítulo 6, “Recomendaciones de Diseño”</b> .....                 |            |
| 6.1 Filosofía Fundamental de Diseño .....                            | 139        |
| 6.2 Comportamiento Constitutivo y Propiedades de los Materiales..... | 140        |
| 6.3 Ductilidad.....                                                  | 141        |
| 6.4 Diseño por Cortante .....                                        | 142        |
| 6.5 Refuerzo Externo Adherido .....                                  | 142        |
| 6.5.1 Diseño de elementos adheridos reforzados con FRP .....         |            |
| 6.5.1.1 Comportamiento a Flexión .....                               | 142        |
| 6.5.1.2 Grietas por Flexión .....                                    | 144        |
| 6.5.1.3 Deflexiones .....                                            | 144        |
| 6.5.1.4 Longitud de Desarrollo .....                                 | 144        |

|                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.5.1.5 Longitud de Transferencia .....                                              | 144 |
| 6.5.2 Consideraciones de Diseño para Rehabilitación de Estructuras de Concreto ..... | 145 |
| 6.5.2.1 Refuerzo a Flexión .....                                                     | 145 |
| 6.5.2.2 Ductilidad .....                                                             | 146 |
| 6.5.2.3 Refuerzo a cortante .....                                                    | 147 |
| 6.5.2.4 Mejora del comportamiento axial .....                                        | 149 |
| 6.6 Refuerzo No Adherido .....                                                       | 153 |
| 6.6.1 Resistencia a Flexión .....                                                    | 153 |
| 6.6.2 Deflexiones .....                                                              | 153 |
| 6.7 Barras FRP .....                                                                 |     |
| 6.7.1 Consideraciones Generales .....                                                | 154 |
| 6.7.2 Filosofía de Diseño .....                                                      | 154 |
| 6.7.3 Diseño con las propiedades de los materiales .....                             | 155 |
| 6.7.4 Flexión .....                                                                  | 157 |
| 6.7.4.1 Consideraciones Generales .....                                              | 157 |
| 6.7.4.2 Suposiciones .....                                                           | 158 |
| 6.7.5 Cortante .....                                                                 | 160 |
| 6.7.5.1 Consideraciones Generales .....                                              | 160 |
| 6.8 Software de Diseño .....                                                         | 160 |
| <b>Capítulo 7, "Compuestos FRP en México"</b>                                        |     |
| 7.1 Situación actual de los Compuestos FRP en el mundo .....                         | 162 |
| 7.1.1 Norte América .....                                                            | 162 |
| 7.1.2 Japón .....                                                                    | 163 |
| 7.1.3 Europa .....                                                                   | 165 |
| 7.1.4 Latinoamérica .....                                                            | 166 |
| 7.2 Situación Actual en México .....                                                 | 170 |
| 7.3 Perspectivas de los Compuestos FRP en México .....                               | 173 |
| <b>Conclusiones</b> .....                                                            | 174 |
| <b>Bibliografía</b> .....                                                            | 176 |
| <b>Apéndice A</b> .....                                                              | 180 |
| <b>Apéndice B</b> .....                                                              | 182 |



**Abrasión.** Desgaste de los materiales por fricción.

**Acelerante.** Material que actúa sinérgicamente con el promotor para acelerar la reacción química entre el catalizador y la resina.

**Ácido Isoftálico.** Compuesto empleado en la fabricación de las resinas poliéster para aumentar la resistencia a factores ambientales severos y aumentar la temperatura de deflexión por calor.

**Aditivo.** Es un componente constitutivo que puede ser añadido a la matriz del compuesto para modificar sus propiedades y, en general, incrementar su desempeño. Los aditivos incluyen catalizadores, colorantes, retardantes de flama y otros ingredientes que amplían y mejoran las capacidades de la matriz.

**Adhesión.** Estado en donde dos superficies se mantienen unidas por fuerzas interfaciales.

**Adhesivo.** Sustancia en forma de pasta, líquido o sólido empleada para unir dos substratos mediante uniones físicas o químicas.

**Adhesivo Estructural.** Agente de unión usado para transferir cargas entre las partes o substratos que une. Normalmente debe trabajar a temperaturas de 100°C

**AFRP.** Aramid Fiber Reinforced Polymer.

**Agente de Curado.** Agente catalítico o reactivo que, cuando se añade a la resina, causa la polimerización. También es llamado endurecedor.

**Agente de Unión o Acoplante.** Material empleado en la modificación de las superficies, diseñado para dar una mayor adherencia entre la superficie de la fibra y la resina.

**Alcalinidad.** Condición de tener o contener iones de hidroxyl (OH); o condición de tener un pH mayor que 7.

**Almidonado.** Tratamiento de superficie o recubrimiento aplicado a los filamentos para mejorar la unión filamento – resina y dar manejabilidad y atributos de durabilidad.

**Ambiente.** Area que rodea, abarcando hacia todos lados. En compuestos, se refiere a las condiciones ambientales como temperatura, humedad, presión, etc.

**Anisotrópico.** Material que no tiene las mismas propiedades físicas en todas direcciones.

**Aramida.** Fibra usada por su alta resistencia y su alto módulo (rigidez). Es un material orgánico derivado de la poliamida pero se incorpora una estructura en forma de anillo.

**Área de Unión.** El area nominal de interfase entre dos elementos a través de los cuales se desarrolla o puede desarrollarse la adhesión.

**Arquitectura de la Fibra.** Diseño del refuerzo; el arreglo de las fibras para alcanzar resultados específicos. Ejemplos: telas trenzadas (cosidas o tejidas), colchonetas, hilo itinerante, etc.

**Aseguramiento de Calidad.** Acciones tomadas por la empresa para garantizar que el producto o servicio cumpla con las especificaciones requeridas por el cliente y que éstos se realicen de acuerdo con los estándares de proceso aplicables.

## B

**Barra FRP.** Material compuesto de forma estructural delgada adecuada para refuerzo interno del concreto y consiste en fibras unidireccionales colocadas de forma longitudinal aglutinadas por un material polimérico rígido. La barra puede tener sección transversal variable (comúnmente circular o rectangular) y puede tener la superficie corrugada o deformada para mejorar la adherencia con el concreto.

**Brea.** Producto residual del petróleo, del cual se puede obtener fibras de carbono.

## C

**Cable.** Elemento de construcción utilizado generalmente para concreto presforzado. También es utilizado para puentes atirantados. Formado por tendones torcidos.

**Carbono.** Elemento común en todas las sustancias orgánicas. El grafito es una de las formas en las que el carbono aparece en forma natural (como un diamante).

**Carbono - Carbono.** Un compuesto que consiste en una matriz de carbono y un refuerzo de carbono.

**Carga Viva.** Cualquier carga que no es permanentemente aplicada a una estructura.

**Carrete.** Herramienta central en donde alrededor de ella se enrolla tela, fibra u hojas impregnadas de resina para formar tubos.

**Catalizador.** Sustancia que favorece el inicio de una reacción química bajo condiciones poco severas que de otra manera son requeridas. También es llamado incorrectamente iniciador.

**Cementante.** Tratamiento químico aplicado a un arreglo aleatorio de fibras de vidrio para dar integridad a las colchonetas. Algunos cementantes son utilizados para promover la compatibilidad química con varios tipos de resina utilizadas.

**CFRP.** Carbon Fiber Reinforced Plastic.

**Coefficiente de Expansión Térmica (CTE).** El cambio de longitud (o volumen) por unidad de longitud (o volumen) producido por la variación de un grado centígrado de temperatura.

**Cohesión.** Propiedad de una sustancia simple a adherirse a sí misma. La atracción interna de sus moléculas entre sí. La fuerza que mantiene a una sustancia unida.

**Colchoneta.** Material fibroso para reforzar plástico consistente en filamentos cortados orientados aleatoriamente.

**Colchoneta Trenzada.** Refuerzo de fibra de vidrio que utiliza hilos itinerantes continuos que son cortados en pequeñas trenzas, tienen un patrón aleatorio y se mantienen unidos por un cementante.

**Componente.** Material que forma parte de un material compuesto. Un componente puede ser una matriz, un refuerzo, materiales de relleno y aditivos.

**Compuesto.** Es una combinación de uno o más materiales diferentes en forma o composición a nivel macroescala. Los constituyentes mantienen su identidad, es decir, no se disuelven o desaparecen completamente uno dentro del otro generando interfases. En los componentes si existe una buena adhesión entre ellos trabajan en conjunto. Normalmente, los componentes pueden ser identificados físicamente. (ver Compuesto FRP).

**Compuesto FRP (FRP Composite).** Matriz polimérica termofija o termoplástica, acompañada con una fibra de refuerzo u otro material con suficiente relación de aspecto (longitud - espesor) para dar la función de refuerzo en una o más direcciones.

**Conductividad térmica.** Propiedad de un cuerpo particular para transferir calor.

**Contenido de Fibra.** Cantidad de fibra presente en un compuesto. Usualmente es expresado en porcentaje del volumen o del peso del compuesto.

**Contenido de Resina.** Cantidad de resina en un compuesto expresado tanto en porcentaje del peso total como del volumen total.

**Contracción.** Disminución de la longitud o el volumen causado por el curado, secado y/o cambios químicos.

**Contracción térmica.** Contracción causada por la disminución de la temperatura.

**Curado.** Cambio irreversible en las propiedades de las resinas termofijas debido a reacciones químicas. El curado puede realizarse mediante agentes de curado, con

o sin calor y/o presión. También se aplica este término en el fraguado del concreto.

**Cortante.** Acción o fuerza resultante de la aplicación de fuerzas que causan o tienden al deslizamiento relativo de dos partes contiguas de un cuerpo entre sí en dirección paralela a su plano de contacto.

## D

**Deformación.** Cambio en las dimensiones o la forma debido a una fuerza o cambio de temperatura. Deformación por unidad de longitud debido a la fuerza.

**Deformación Plástica.** Cambio en dimensiones de un objeto bajo carga que no son recuperadas cuando la carga es removida. Opuesta a la deformación elástica.

**Degradación.** Disminución de las propiedades mecánicas o físicas (color) de un material.

**Delaminación.** Separación de capas de un material en lámina, puede ser local o cubrir un área grande. Puede ocurrir en el curado o durante la vida del producto.

**Desmoldante.** Sustancia usada para prevenir la adhesión no deseada de un material compuesto en el molde. Asiste en la remoción de una parte del molde.

**Dieléctrico.** Habilidad de un material a resistir el flujo de electricidad. Material no conductor.

**Dirección de la Fibra.** Orientación o alineación del eje longitudinal de la fibra respecto a un eje de referencia.

**Ductilidad.** Habilidad de una parte a resistir carga con deformación permanente sin romperse. Habilidad de un material a deformarse plásticamente antes de la fractura.

**Durabilidad.** Habilidad de un material a resistir la acción del ambiente, ataque químico, abrasión y otras condiciones de servicio. Además, es la capacidad de una estructura o sus componentes de mantener la servicialidad a través del tiempo al que fue diseñado en un ambiente específico.

**Dureza Barcol.** Valor de dureza obtenido con la medición de la resistencia a la penetración de una forma de acero bajo un punto con una carga. La escala es de 0 a 100, el valor de dureza es usado la medir el grado de curado de un plástico.

## E

**Elasticidad.** Habilidad de un material a recobrar su tamaño y forma original después de retirar la fuerza que causó la deformación.

**Elongación.** Incremento de la longitud de un material.

**Elongación de Ruptura.** Elongación dada en el momento de la ruptura del ejemplar o espécimen, frecuentemente es expresado en porcentaje de la longitud original.

**Endurecedor.** Sustancia añadida a la resina termofija para provocar la reacción de curado.

**Epóxico.** Polímero termofijo que contiene uno o más grupos epoxidos y es curado por la reacción con las aminas, alcoholes,

ácidos carboxílicos, ácidos anhídridos y mercaptanos.

**Esfuerzo a impacto.** Capacidad de un material de soportar una carga repentina.

**Esfuerzo a flexión.** Propiedad de un material o elemento de una estructura que indica su capacidad a resistir la falla a flexión. Unidad de resistencia a la carga máxima antes de la falla por flexión.

**Esfuerzo cortante.** Fuerza cortante máxima que un elemento a flexión pueda soportar es un lugar en específico combinando efectos de fuerzas de cortante y momento flexionante.

**Esfuerzo de adherencia.** Medida de la fuerza necesaria para separar dos superficies unidas, calculado como la carga/ área de unión.

**Esfuerzo de compresión.** Capacidad de un material o estructura de resistir una fuerza de carga. La carga de compresión máxima sostenida por el material o estructura es dividida por el área de la sección transversal original.

**Esfuerzo de fatiga.** Máxima fuerza cíclica que un material puede soportar para un número dado de ciclos antes de que ocurra la falla.

**Esfuerzo de fluencia.** Fuerza en el punto de fluencia. Fuerza a la cual el material exhibe una desviación específica de la curva esfuerzo – deformación.

**Esfuerzo de tensión.** Fuerza máxima que un material es capaz de resistir bajo una carga axial de tensión.

**Esfuerzo Interlaminar.** Fuerza cortante que produce un desplazamiento relativo entre dos capas a lo largo de su interfase.

**Estabilidad Dimensional.** Habilidad de una parte a retener la forma precisa a la cuál fue formado.

**Estructura Sándwich.** Paneles compuestos de un material central ligero, tal como el panel, madera balsa, plástico espumoso encerrados en dos capas relativamente delgadas, densas, de alta resistencia y gran rigidez.

**Expansión térmica.** Expansión causada por el aumento de temperatura.

## F

**Fatiga.** Disminución o falla de las propiedades mecánicas después de aplicaciones repetidas de fuerza.

**Fenólico.** Resina termofija producida por la condensación de un alcohol particularmente basado en fenol (ácido carbólico).

**Fibra.** Término general para un material cuya relación longitud diámetro es mayor a 10. La unidad simple de una sustancia que se rompe en partes para poder ser tejido; un filamento.

**Fibra de Carbono.** Fibra producida por la pirólisis de fibras orgánicas precursoras tales como el rayón, poliacrilonitrilo (PAN) y brea en un ambiente inerte.

**Fibras de Refuerzo con Plástico (FRP).** Término general de un compuesto que es reforzado con tela, colchonetas, hilo trenzado o cualquier forma de fibra.

**Fibra de Vidrio.** Fibra derivada de un producto inorgánico fusionado que ha sido congelado sin cristalización.

**Fibra de Grafito.** Fibra que contiene más del 99% de carbono elemental hecho por oxidación.

**Filamento.** Unidad más pequeña de un material fibroso.

**Filamento continuo.** Fibra hecha por giro de una unidad larga continua.

**Fluencia Plástica (Creep).** Cambio en las dimensiones del material debido a una carga sostenida a través de un periodo de tiempo, no incluye la deformación elástica inicial del material. Es parte de la deformación dependiente del tiempo resultado de la aplicación de una carga.

**Fractura.** Separación del cuerpo. Definida como la ruptura de la superficie sin una separación completa o con la separación completa debido a fuerzas internas o externas.

**FRP.** Polímero Reforzado con Fibras. En este trabajo se utilizará indistintamente con Fibra de Refuerzo con Polímeros. En inglés suele nombrarse *Fiber Reinforced Polymer*.

**FRPA.** Fibra de Refuerzo con Polímeros - Aramida. Se refiere a que la fibra de refuerzo es de aramida.

**FRPC.** Fibra de Refuerzo con Polímeros - Carbono. Se refiere a que la fibra de refuerzo es de carbono. Incluye las fibras de grafito.

**FRPV.** Fibra de Refuerzo con Polímeros - Vidrio. Se refiere a que la fibra de refuerzo es de vidrio.

**Fuerza de Adherencia.** Fuerza por unidad de área necesaria para romper la unión.

## G

**GFRP. Glass Fiber Reinforced Plastic.**

## H

**Híbrido.** Lámina compuesta de dos o más sistemas de materiales compuestos. Una combinación de dos o más fibras, como carbono y vidrio o carbono y aramida, dentro de la estructura.

**Hilo.** Ensamble de filamentos torcidos, fibras o trenzas que pueden ser naturales o manufacturados, para formar longitudes continuas que son adecuadas para el uso del tejido en materiales como telas o tejidos.

**Hilo Itinerante (Roving).** Determinado número de hilos, trenzas o hilos jalados reunidos en un ramillete con un poco de torcimiento o sin torcimiento.

**Hilo Itinerante Continuo.** Filamentos paralelos recubiertos con almidón, puestos juntos en trenzas simples o múltiples y enrollados en paquetes cilíndricos.

**Hilo Jalado (Tow).** Ramillete no torcido de filamentos continuos. Comúnmente es usado para las fibras hechas a mano, particularmente el carbono y el grafito, aunque también el vidrio y la aramida. Un tow con designación 140K significa que tiene 140,000 filamentos.

## I

**Impregnación.** En plásticos reforzados, saturar el refuerzo con resina. Proceso de llenar las hendiduras de un cuerpo poroso con un componente polimérico.

**Inhibidor.** Sustancia que retarda la reacción química. También se usan ciertos tipos de monómeros y resinas para prolongar el tiempo de almacenamiento.

**Iniciador.** Peróxidos usados como radicales libres. Son usados en las polimerizaciones libres de radicales para el curado de resinas termofijas, como agentes cruzados para elastómeros y polietileno.

**Interfase.** Superficie límite común entre dos sustancias. En una compuesto, es el área de contacto entre la resina y el refuerzo. En las fibras, es el área de contacto con el almidón o el acabado.

**Interlaminar.** Término que describe un evento que ocurre entre dos o más capas adyacentes.

**Isopoliéster.** Resina que ha sido reformulada con ácido isoftálico y glicoles de varios tipos para aumentar la resistencia al calor, al agua y a la corrosión.

**Isotrópico.** Material que tiene propiedades uniformes en todas las direcciones.

## K

**Kevlar. Ver aramida**

# L

**Lámina.** Dos o más capas de fibra colocadas juntas en una matriz de resina usualmente a través de presión y calor.

**Lámina unidireccional.** Lámina de plástico con fibras de refuerzo que sustancialmente todas sus fibras están orientadas en la misma dirección.

**Lámina bidireccional.** Lámina de plástico con fibras de refuerzo con fibras orientadas en dos direcciones en su plano. Es una lámina transversal.

# M

**Malla.** Área transversal grande construida en dos y tres ejes axiales hecha de filamentos continuos. Cuadrícula rígida de dos dimensiones (plano) o tres dimensiones (espacial) de barras FRP interconectadas formando un enrejado que puede ser usada como refuerzo del concreto.

**Material de relleno (Carga).** Adición inorgánica para la matriz que da una buena cantidad de mejoras al desempeño del compuesto, tales como control de contracciones, superficies lisas, resistencia al agua y reducción de costos. Algunas veces el término es usado específicamente para referirse a algunos aditivos en particular.

**Matriz.** La resina homogénea esencialmente o material polimérico en donde el sistema de fibras es embebido, se puede utilizar tanto resinas termofijas como termoplásticas.

**Microagrietamiento.** Grietas formadas cuando la fuerza ejercida supera el esfuerzo de la matriz.

**Mil.** Unidad de medición para el diámetro de los hilos de vidrio (1 Mil = 0.001 pulgadas).

**Módulo.** Relación de fuerza – deformación. Un alto módulo indica un material rígido.

**Módulo a flexión.** Relación, con el límite elástico, de la fuerza aplicada en un espécimen de prueba a flexión y la correspondiente deformación.

**Módulo de elasticidad.** Relación de la fuerza normal correspondiente a la deformación por fuerzas de tensión o compresión debajo del límite proporcional del material.

**Módulo de Young.** Relación de la fuerza normal y la correspondiente deformación debido a la fuerza de tensión o compresión.

**Molde.** Cavidad donde los materiales para el compuesto son colocados para poder fabricar el producto final.

**Moldeo.** El material de refuerzo es colocado en posición en el molde. El proceso de colocar el material de refuerzo en el molde.

**Moldeo abierto.** Término general utilizado para describir la fabricación de los compuestos donde la resina y el refuerzo son colocados en un molde abierto.

**Moldeo por aspersión.** Técnica en donde con una pistola rociadora es usada como herramienta de aplicación. En los plásticos reforzados, la fibra y la resina pueden ser colocados simultáneamente en el molde.

**Moldeo por compresión.** Técnica de manufactura de compuestos en donde los materiales termofijos son comprimidos entre moldes de dado usando presión hidráulica y calor hasta que los materiales son curados hasta su forma final.

**Moldeo por compresión (SMC).** Compuesto de fibras, resina líquida termofija y otros aditivos que son colocados juntos y procesados dentro de una hoja para facilitar el manejo en la operación de moldeo.

**Moldeo a mano.** Método de fabricación en donde las capas de refuerzo son pre impregnadas o recubiertas y colocadas en el molde a mano, después son curadas en la forma deseada.

**Moldeo por transferencia de resina (RTM).** Proceso donde la resina catalizada es transferida o inyectada en un molde cerrado en donde el refuerzo de fibra ya fue colocado con anterioridad.

**Monómero.** Molecula simple que puede reaccionar con moleculas iguales o diferentes para formar un polimero. La estructura repetitiva más pequeña de un polimero.

**MRI.** Magnetic Resonance Imaging Equipo médico utilizado para obtener ciertos estudios. Se refiere a las instalaciones donde son colocados éstos equipos.

## N

**Núcleo (Core).** Miembro central, usualmente de espuma o panal, de una estructura sándwich al cuál las capas o caras de la estructura son adheridos.

## O

**Ortotrópico.** Material que tiene seis diferentes tipos de módulo y relación de Poisson.

## P

**PAN.** Fibra de carbono hecha de fibra de poliacrilonitrilo (PAN).

**Panal.** Producto manufacturado de hojas con resina impregnada con formas de celdas hexagonales como panal de abeja. Usadas como nucleo de las estructuras sándwich.

**Patrón de la Fibra.** Fibras visibles en la superficie de las laminas o los moldeados.

**Plástico.** Material que contiene como ingrediente esencial un polimero orgánico de gran peso molecular, endurecedores, materiales de relleno, refuerzos y por ultimo que es solido en su estado final.

**Poliéster.** Resina producida por la policondensación de los derivados de dihidroxi y acidos orgánicos dibásicos o resinas anhídras que pueden ser compuestas con vinil.

**Polimero.** Compuesto natural o sintético de alto peso molecular que contiene unidades repetidas.

**Polimerización.** Reacción química en donde las moléculas del monómero son unidas.

**Propiedades Mecánicas.** Propiedades de un material como esfuerzo y módulo a tensión que son asociadas con la reacción elástica e inelástica cuando una fuerza es aplicada. La relación entre la fuerza y la deformación.

**Precursor.** Fibras de rayón, PAN o brea de donde las fibras de carbono o grafito son derivadas.

**Prepreg.** Material listo para el moldeo en forma de hojas o listo para enrollarse en forma de hilo roving, los cuales pueden ser colchonetas, telas, fibras unidireccionales o papel impregnado con resina y almacenado para su uso posterior.

**Promotor.** Sustancia química que reduce la activación de energía requerida para un iniciador dado.

**Pultrusión.** Proceso continuo de fabricación de compuestos que tienen una sección transversal constante. El proceso consiste en jalar la fibra de refuerzo a través de la impregnación de resina y pasando por un dado con la forma, donde la resina es curada.

**Punto de Fluencia.** Punto al cual la deformación permanente de un espécimen esforzado empieza a tomar lugar.

## R

**Recubrimiento Gel.** Resina de rápida colocación aplicada a la superficie del molde y gelatinizada después de la colocación de capas. Usualmente es usado para mejorar la apariencia de la superficie.

**Refuerzo.** Materiales resistentes adheridos o dentro de una matriz para aumentar las propiedades mecánicas. Materiales que

van desde las fibras cortas hasta formas complejas de telas y tejidos, que si son combinadas con una resina aumentan las propiedades mecánicas.

**Refuerzo a cortante.** Refuerzo diseñado para resistir el esfuerzo cortante o fuerzas de tensión diagonal.

**Refuerzo a tensión.** Refuerzo diseñado para tomar las fuerzas de tensión. Puede ser refuerzo interno o externo.

**Refuerzo de fibra de vidrio.** Material mayormente usado para reforzar plástico. Disponible en colchonetas, telas, hilo itinerante, etc.

**Relación de aspecto.** Relación de longitud-diámetro. Para un compuesto, se refiere a la relación específica de la fibra en una matriz.

**Relación de Poisson.** Relación de la deformación unitaria transversal con la correspondiente deformación axial debajo del límite proporcional.

**Resistencia a la corrosión.** Capacidad de un material a soportar el contacto con los factores del ambiente natural o aquellos artificiales que son creados en la atmósfera sin degradarse o alteración de sus propiedades.

**Reología.** Estudio del comportamiento general de la deformación y la fluencia de los materiales sujetos a esfuerzos, por medio de modelos mecánicos, particularmente el flujo plástico de los sólidos. La ciencia que trata la deformación y el flujo.

**Resina.** Líquido viscoso natural o sintético, sólido o semisólido material orgánico frecuentemente de alto peso molecular que tiene tendencia de fluir bajo fuerza. Material polimérico que es rígido o semirígido a temperatura ambiente generalmente con punto de fusión por debajo de la temperatura ambiente.

**Resistencia Dieléctrica.** Propiedad de un material aislante de soportar una fuerza eléctrica.

**Retardantes de fuego.** Ciertos químicos que son usados para reducir la tendencia de la resina a prenderse en llamas.

**Rigidez.** Medida del modulo de elasticidad o la habilidad del material de deformarse. Relación de carga – deformación.

**Rotación de filamentos.** Proceso para fabricar una estructura de compuestos en donde el refuerzo continuo (filamentos, cables, hilos, cintas u otros), previamente impregnados con resina o impregnados durante el enrollamiento, son colocados sobre un carrete. Generalmente, la forma es una superficie de revolución.

## S

**Sistemas de Reparación.** Reemplazar o corregir materiales, componentes o elementos deteriorados o dañados de una estructura. Materiales o técnicas usadas para la reparación.

**Solvente.** Líquido en el cual otra sustancia puede ser disuelto.

**Substrato.** Material o parte que puede ser unido o recubierto para algún propósito.

## T

**Tejidos.** Patrón específico de una tela que es hecha por el entrelazamiento de hilos.

**Telas.** Arreglo de fibras que permanecen unidas en dos dimensiones. Una tela puede ser tejida, no tejida o cosida.

**Tela tejida.** Material construido por hilos, filamentos o fibras entrelazados.

**Tela no tejida.** Material formado por fibras o hilos sin entrelazar. Pueden ser cosido, amarrado o pegado.

**Temperatura de Transición del Vidrio.** Punto medio de un rango de temperatura en el cual un material amorfo cambia de o a estado quebradizo o vítreo a estado plástico.

**Temperatura de deflexión por calor.** Temperatura a la cual un material plástico tiene una deflexión arbitraria cuando se somete a una carga y condición de prueba arbitraria. es una indicación de la temperatura de transición del vidrio.

**Tendón.** Material de construcción hecho de fibras continuas en forma de un tendón usado para reforzar concreto. Los tendones son usados en concreto presforzado.

**Termofija.** Resina de cadenas de polimeros, entrecruzadas. La resina termofija no puede modificadas en su forma por efecto del calor debido a que las cadenas de polimeros forman una red tridimensional altamente estable al calor.

**Termoplástica.** La resina termoplástica puede ser modificada en su forma por efecto del calor.

**Torón.** Elemento de construcción formado por tendones en forma longitudinal sin trenzar o torcer. Utilizado generalmente para concreto presforzado.

**Trenza - Trenzado.** Ramillete de filamentos, normalmente no torcidos o un ensamble de filamentos continuos unidos con almidón y usados como una unidad. Tejido de fibras en forma tubular para ser usado como refuerzo en lugar de un refuerzo plano.

**Trioxotrópico.** Material en forma de gel pero que cuando es agitado se vuelve líquido.

## U

**Urdimbre.** Hilo que corre a lo largo de una tela tejida. Grupo de hilos en grandes longitudes.

**Unión.** La adhesión y sujeción de un material a otras superficies en contra de donde es colocado.

## V

**Vidrio E.** Familia de vidrios con una composición de calcio alúmina borosilicato y un contenido máximo alcalino del 2%.

**Vidrio S.** Composición de magnesio alúmina silicato que es especialmente diseñado para dar filamentos de vidrio con alta resistencia a la tensión.

**Viniléster.** Clase de resina termofija que contiene éster de acrílico y/o ácidos metacrílicos, muchos son hechos con resina epóxica.

**Viscosidad.** Propiedad del cuerpo de un material de resistir a cambios en su forma: fricción interna.

**Velo.** Colchoneta ultra ligera que es usada para aumentar la calidad de la superficie de un compuesto. Puede ser usada para dar protección ultravioleta.

La industria de la construcción en México atraviesa una crisis de gran importancia. Para la reactivación de ésta se necesita de muchos factores, entre los cuales podemos mencionar el uso de nuevas tecnologías y nuevos materiales los cuales ofrezcan mayores beneficios y ventajas sobre los materiales y técnicas tradicionales.

Es importante para el Ingeniero Civil y quienes están inmersos en la construcción, conocer este tipo de materiales como los Compuestos FRP (Polímeros Reforzados con Fibras o Fibras de Refuerzo con Polímeros), los Concretos de Muy Alta Resistencia (RPC, Reactive Powder Concrete; HPC, High Performance Concrete) entre otros. Es de suma relevancia para todos los involucrados en proyectos de infraestructura civil tener reconocidos los aspectos fundamentales y especiales de un material nuevo.

La intención de presentar este trabajo es la de difundir e impulsar el conocimiento y uso de los nuevos materiales como los compuestos FRP, los cuáles por su perfil físico y mecánico en comparación con el acero y otros materiales convencionales para construcción, los hace sobresalientes; pesar un cuarto que el acero y resistir el doble son algunas características por no mencionar su resistencia a la corrosión, cero conductividad eléctrica, estabilidad térmica, etc.

En el primer capítulo se introduce a los Compuestos FRP en todos sus aspectos, desde la historia y los materiales que los constituyen, formas de refuerzo, tipos de resinas hasta los procesos de fabricación. Conforme se desarrolla este trabajo se hacen aclaraciones y recomendaciones pertinentes para conocer los aspectos más básicos. Es importante conocer las formas disponibles de refuerzo, por lo general, son clasificadas por su forma, actualmente existen barras circulares con las fibras rectas, torcidas o entrelazadas, así como con diferentes tipos de superficie o acabado como corrugado o recubiertas con arena; también existen barras rectangulares con los mismos tratamientos de superficie. Existen mallas de refuerzo planas y tridimensionales; y también existen las laminas y tiras, así como perfiles de forma definida – ángulos, T s, cuadrados, etc. – .

Las propiedades físicas y mecánicas son un aspecto fundamental para el uso de los Compuestos FRP para poder hacer una selección apropiada del material a utilizar en un proyecto específico que requiera características especiales. El campo de acción de estos compuestos se presenta en el capítulo 3, donde se manifiestan las circunstancias en que se pueden aplicar y es donde la infraestructura civil tiene mayores problemas, en ambientes corrosivos y errores de diseño, así como métodos constructivos mal aplicados, entre otros.

Los compuestos FRP en sus diferentes formas pueden ser utilizados como refuerzo para concreto reforzado; como elemento para reforzamiento, rehabilitación, reparación o mejoramiento de estructuras existentes de concreto reforzado, mampostería y madera – losas, muros, columnas, vigas, etc. – ; para elementos presforzados y postensados de concreto; elementos prefabricados; infraestructura ferroviaria – durmientes – ; elementos arquitectónicos y muchas otras aplicaciones más.

Por las condiciones de operación de las estructuras, los compuestos FRP pueden ser usados en estructuras expuestas a salinidad, plantas de procesos químicos, plantas de tratamiento de aguas residuales, instalaciones petroquímicas, en la industria papelera y textil, torres de enfriamiento de agua, plantas nucleares, estructuras cerca y dentro del mar, instalaciones telefónicas, torres de telecomunicaciones y de transmisión, torres de control en aeropuertos, hospitales (instalaciones de resonancia magnética y rayos x), acuarios, albercas, muelles, puertos, diques, pilotes, postes de concreto para alumbrado o conducción, centros de cómputo, instalaciones subterráneas, ductos, estructuras sujetas a agentes corrosivos, etc.

La durabilidad es un aspecto que tiene mucha importancia hoy en día, y que los compuestos FRP son ideales para este rubro, los aspectos relacionados con la durabilidad se presentan en el capítulo 4.

Hoy en día, el análisis de costo del ciclo de vida, que está muy ligado a la durabilidad es un aspecto que toma mayor fuerza, y que en México no es un ejercicio realizado con frecuencia en los proyectos, es por esto que el capítulo 5 presenta un esquema general de cómo realizar este tipo de análisis y las consideraciones que hay que hacer para proyectos con este tipo de materiales.

Una vez convencidos del desempeño de los compuestos FRP, se hacen recomendaciones generales de diseño de elementos estructurales, aunque cabe resaltar que se debe acudir a la literatura y a los códigos de diseño para profundizar en el tema.

Por último, se da un panorama del estado actual de países que tienen un gran desarrollo en el área de los FRP en la construcción para poder situar la condición de México, inmediatamente se dan a conocer los sistemas existentes en nuestro país y proyectos que hasta el momento se han realizado.

Un proyecto de este tipo no puede completarse sin la ayuda y el apoyo de muchas personas que contribuyeron a la realización de este trabajo y hacia ellas todo mi agradecimiento. Ing. Carlos Gómez Toledo, quien ha asesorado y dirigido con gran interés este trabajo; Dr. Sergio Alcocer Martínez de Castro y el Ing. José Luis Esquivel Avila, quienes colaboraron en la revisión de este trabajo; Ing. Hugo D. Cuadros Abad de Sika Mexicana, quien gentilmente proporcionó información; Ing. Fernando García Ayala de MBT Mexico, quien de igual manera colaboró con información; M.C. Amando Padilla Ramírez de la Asociación Nacional de las Industrias de Compuestos Moldeables y Plásticos Reforzados ACP y profesor de la Facultad de Química – UNAM, quien apoyó en la parte química; Ing. Jorge Zambrano de Sika Colombia, quien amablemente proporcionó información; Ing. Fernando Isunza de Euroestudios y a la Lic. María Eugenia Steta de la Sección Centro y Sur de México del ACI, quien amablemente colaboró con una infinidad de libros.

# COMPUESTOS FRP

## 1.1 Antecedentes

---

Los Compuestos combinan dos diferentes materiales, de manera que estos materiales se unen completamente entre ellos creando un sistema y aprovechan características combinadas de dichos materiales, lo cual nos da muchos beneficios, por ejemplo, el incremento del esfuerzo y la estabilidad dimensional. El concepto de "Compuesto" en la industria de la construcción ha existido desde tiempos remotos. Las civilizaciones en todo el mundo usaron elementos básicos de los ambientes que los rodeaban, para la fabricación de sus viviendas. Por ejemplo, los egipcios, sus "ladrillos" los hacían de barro y paja, el barro actuaba como cementante y relleno (ejemplo actual, la resina en los compuestos para construcción de fibras de refuerzo con polímeros, FRP) y la paja actuando como refuerzo para mantener el ladrillo unido durante el proceso de secado (y contracción) del ladrillo.

En el método "entrelazado y relleno" para la construcción de muros, elementos verticales de madera, mejor conocidos como muros entrelazados, son tejidos con ramas horizontales (el refuerzo) y después rellenos con arcilla o barro (la resina) para cementar y darle forma. Este es uno de los métodos conocidos más antiguos para fabricar una estructura impermeable y resistente.

Mientras el concepto de compuestos ha existido durante siglos, la incorporación de un refuerzo dentro de una matriz de polímeros (plástico) es relativamente una nueva tecnología. La edad de los plásticos surgió justo después de 1900 con materiales químicos que dieron grandes aportaciones para tener imitaciones de plásticos que superaran su propia naturaleza. El primer producto conocido de compuestos FRP fue el casco de un bote construido a mediados de la década de los 30's como parte de un experimento. Desde el principio, las aplicaciones de los Compuestos FRP han revolucionado industrias enteras, como la aeroespacial, marítima, la de procesos químicos y transportación. Ahora, la atención mundial está puesta en las oportunidades de los compuestos estructurales para la industria de la

construcción e infraestructura civil.

Para poder entender el concepto general de los Compuestos FRP, se debe de entender la relación entre los materiales que los constituyen, cómo son fabricados y los parámetros de operación del producto final.

## 1.2 Perspectiva Histórica

---

El uso general de los Compuestos FRP data de la primera mitad de la década de los 40's, en la industria militar, particularmente para el uso de aplicaciones aeroespaciales y navales. La Fuerza Aérea y la Marina de los Estados Unidos incursionan exitosamente en Compuestos de Vidrio FRP de una gran relación esfuerzo - peso y resistencia al ambiente, así como a los efectos corrosivos de la sal del aire y el océano. En 1945, más de 3.500 toneladas de fibra de vidrio fueron consumidas, principalmente para aplicaciones militares. Rápidamente, los beneficios de los Compuestos FRP, especialmente sus capacidades de resistencia y corrosión fueron difundidos al sector público. Los tubos de fibra de vidrio, por ejemplo, fueron introducidos en 1948 para llegar a ser una de las áreas más usadas en el mercado de la corrosión y la industria petrolera. Los Compuestos FRP han probado ser una alternativa noble a otros materiales tradicionales, aún bajo condiciones de presiones altas y situaciones de grandes diámetros en procesos químicos. Además de la resistencia superior a la corrosión, los tubos FRP ofrecen durabilidad y resistencia, de esta manera, elimina la necesidad de forros internos, revestimientos exteriores y/o protección catódica. Desde principios de los 50's, los Compuestos FRP han sido (y siguen siendo) usados extensivamente para equipamiento de procesos químicos, fabricación de pulpa y papel, energía, tratamiento de residuos y aguas residuales, refinación de metales y otras industrias de manufactura. Un innumerable número de productos e instalaciones FRP existentes, nos ayuda a definir la base para probar el desarrollo en el campo de estos productos, tales como plantas de lavado, tolvas, capotes, ductos, ventiladores, chimeneas, tuberías, bombas y bases para bombas, válvulas, así como tanques para químicos y gasolina.

Las décadas siguientes a los 40's trajeron nuevas y revolucionarias aplicaciones para los Compuestos FRP. La misma tecnología que produjo las tolvas de plástico reforzadas para el proyecto nuclear Manhattan en la Segunda Guerra Mundial originó el desarrollo de los materiales compuestos de alto desempeño, tal como la fibra de carbono, utilizados para la fabricación de motores sólidos para cohetes y tanques en los 60's y 70's. De hecho, en el Skylab, un laboratorio espacial en órbita, fueron utilizados muros de FRP con vidrio en un tanque que provee oxígeno a los astronautas. En 1953, el primer modelo del Chevrolet Corvette con carrocería de fibra de vidrio fue incluido en la línea de ensamble. Ahora, los autos de carreras de gran rendimiento usan fibra de carbono para transferir los pesos. En los 60's, las Marinas de Estados Unidos y de Inglaterra fueron desarrollando simultáneamente barcos de dragado que desde el punto de vista de los Compuestos FRP no solo son superiores que otros materiales en un violento ambiente marino, además, son no magnéticos de naturaleza. También se puede resaltar una ventaja de los Compuestos FRP, la habilidad de los materiales para reducir la sintonía de radar en una estructura, tal como de un barco o un

avión. Los compuestos de fibra de carbono de alto desempeño han sido utilizados en la tecnología más avanzada de aviación, como en el Stealth F-117 y en el Bomber B-2. Actualmente, los Compuestos FRP son usados en aplicaciones espaciales y siguen siendo probados en muchos experimentos de la NASA.

La industria marítima fue la principal consumidora de materiales compuestos en los 60's. En los 70's la industria automotriz sobrepasó a la marítima, convirtiéndose en la industria número uno, posición que ocupa hasta ahora. Los Compuestos tienen también un gran impacto en la industria de transmisión eléctrica con productos como equipos multilínea y aisladores.

Mientras la mayoría de los datos históricos y de durabilidad de las instalaciones con Compuestos FRP vienen de la industria aeroespacial, marítima y de procesos químicos, los Compuestos FRP han sido usados como material de construcción por mucho tiempo. Al principio, los materiales Compuestos FRP fueron utilizados para reforzar estructuras de concreto a mediados de los 50's. En los 80's, resurgió el interés cuando nuevos desarrollos fueron lanzados para aplicar las barras de refuerzo FRP en concreto, las cuales requerían un perfil especial, tal como propiedades no magnéticas o en áreas donde el ataque químico es severo.

Los Compuestos han sido utilizados desde los 50's en la arquitectura, empezando con estructuras semipermanentes y continuando con la restauración de edificios históricos y aplicaciones estructurales. Algunos productos típicos desarrollados fueron los domos, paneles traslúcidos, paneles exteriores.

Durante finales de los 70's y principios de los 80's, muchas aplicaciones de los Compuestos reforzados fueron utilizadas en Europa y Asia. En 1986, fue construido en Alemania, el primer puente del mundo utilizando tendones de compuestos reforzados. En China se construyó el primer puente en donde la plataforma fue hecha completamente con Compuestos FRP. El primer puente peatonal construido totalmente con Compuestos, fue instalado en Aberfeldy, Escocia en 1992. En los Estados Unidos, se construyó la primera plataforma de un puente reforzado con FRP en McKinleyville, WV, en 1996; seguido por el primer puente vehicular en Russell, Kansas. Innumerables puentes peatonales han sido instalados en las autopistas de los Estados Unidos y Parques Nacionales, en localidades remotas y de difícil acceso por el equipo pesado de construcción.

Para el 2002 y años posteriores, los fabricantes y distribuidores de los Compuestos están desarrollando activamente productos para infraestructura civil, considerado como el mayor mercado para los Compuestos FRP. El refuerzo y reparación de concreto, reparación y sustitución de plataformas de puentes, tecnología de compuestos - híbridos (la unión de los compuestos con concreto, madera y acero), pilotaje marino y programas de mejoramiento de muelles son sólo algunas áreas que actualmente se encuentran explorando.

### 1.3 Estadísticas de la Industria de los Compuestos

Las asociaciones de la industria de los compuestos y productores de materiales han dividido sus envíos en ocho mercados principales (con un noveno llamado "Otros"). Estos son aeroespacial/ aviación, equipos para dispositivos y aparatos, construcción, productos de consumo, equipamiento anticorrosión, eléctrico, marítimo y transportación. En mayo de 1999, el Instituto de los Compuestos de la Asociación de la Industria del Plástico reportó que los embarques de compuestos para 1998 alcanzaron los 1.80 millones de toneladas. La figura 1.1 muestra la distribución de los materiales compuestos vendidos en 1998. Se estima que tan solo en los Estados Unidos la industria de los compuestos vale \$ 9 billones de dólares.

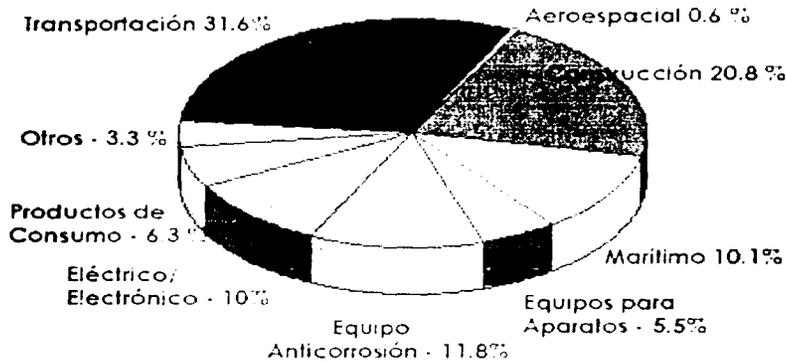


Figura 1.1 Volumen de Embarques de Compuestos en E.U.A.

Fuente: SPI Composites Institute, mayo 1999

La industria de los compuestos ha mostrado un crecimiento en los últimos 10 años y se proyecta que crezca el consumo de compuestos FRP en otros mercados nuevos. La figura 1.2 muestra el crecimiento de los compuestos durante 30 años, esta figura indica el nuevo desarrollo y muestra las nuevas aplicaciones de estos materiales.

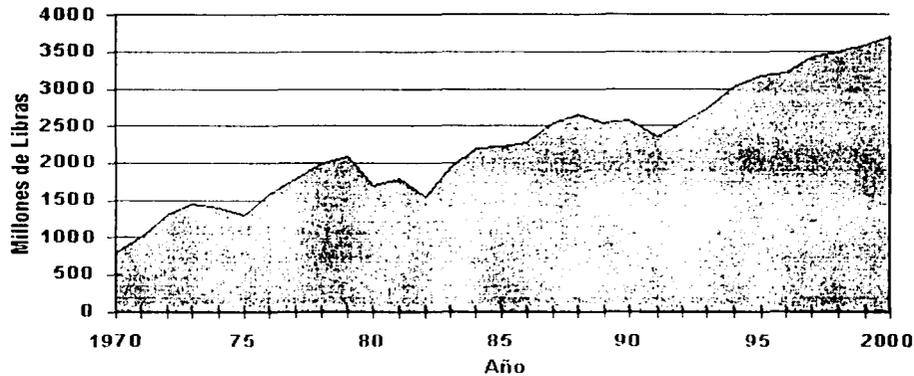


Figura 1.2 Crecimiento de los Compuestos FRP de 1970 al 2000

Fuente: SPI Composites Institute, Mayo 1999

## 1.4 Reglamentación

### 1.4.1 Comités Técnicos

Existen organizaciones profesionales que se dedican a la investigación y con los resultados de estas investigaciones, dan recomendaciones de uso y especificaciones para los Compuestos FRP. Muchas organizaciones han publicado reglamentos, estándares, métodos de pruebas y especificaciones para los FRP y sus respectivos productos.

Por casi veinte años, la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) ha operado un comité técnico llamado Compuestos y Plásticos Estructurales (SCAP) que incluye el diseño y aplicaciones de los compuestos.

El Instituto Americano del Concreto, y su Comité 440 con 10 diferentes subcomités, llevan los compuestos FRP en temas como estado del arte, investigación, educación profesional y estudiantil, reparación, varillas, prestozado y cimbras estructurales. A continuación se muestra una tabla listando las diferentes organizaciones y comités.

| Organización                                                                        | Comité                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Instituto Americano del Concreto (ACI)                                              | 440 - Compuestos para Concreto<br>440C - Reporte del Estado del Arte<br>440D - Investigación<br>440E - Educación Profesional<br>440F - Reparación<br>440G - Educación Estudiantil<br>440H - Concreto Reforzado (Barras)<br>440I - Concreto Pretensado (Tendones)<br>440J - Moldes Estructurales Permanentes<br>440K - Caracterización del Material<br>440L - Durabilidad |
| Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE)                                     | Compuestos y Plásticos Estructurales                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM)                                   | ASTM D20.18.01 - Materiales FRP para concreto<br>ASTM D20.18.02 - Perfiles Perfilados<br>ASTM D30.30.01 - Compuestos para Ingeniería Civil                                                                                                                                                                                                                               |
| Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficialía de Transportación (AASHTO) | Comité en Puentes y Estructuras, T-21 Compuestos FRP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Federación Internacional de Concreto Estructural (FIB)                              | Grupo de Trabajo en FRP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Sociedad Canadiense de Ingenieros Civiles (CSCE)                                    | Materiales Compuestos Avanzados para Puentes y Estructuras                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE)                                      | Comité de Investigación en Estructuras de Concreto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Buro de Investigación de Transportación (IRB)                                       | A20.07 - Compuestos FRP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Figura 1.3 Resumen de los Comités de Especificaciones, Códigos para FRP

Fuente: Product Selection Guide - FRP Composites Products for Bridge Applications, Market Development Alliance, 2001

Muchos comités de la ASTM se encuentran trabajando y reuniendo los métodos de prueba para el uso de barras, materiales de reparación y perfiles estructurales. El Comité de Puentes y Estructuras de la Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficialía de Transportes (AASHTO) estableció un Comité Técnico para Compuestos FRP en 1997.

#### 1.4.2 Organizaciones

Existen muchas organizaciones involucradas con los Compuestos FRP, la Fundación para la Investigación de la Ingeniería Civil (CERF), filial de la ASCE, se encuentra difundiendo las tecnologías investigadas. El Centro de Inteligencia para Estructuras Innovadoras (ISIS) de la Red Canadiense de Centros de Excelencia (CNCE) fue establecido para llevar a la Ingeniería Civil a un liderazgo mundial a través de los Compuestos FRP. ISIS Canadá, a través de sus universidades, ha coordinado un equipo de profesionales para mejorar la tecnología

construyendo caminos, edificios y puentes. ISIS ha manejado muchos proyectos de investigación y campos de evaluación para demostrar la exitosa implementación de los compuestos FRP. ISIS Canadá tiene el crédito de haber construido el primer sensor inteligente de compuestos FRP en un puente, y continúa haciendo mejoras en las áreas de reparación de concreto, construcción de puentes con barras y tendones FRP.

Muchas sociedades profesionales de todo el mundo han publicado reglamentos de diseño para barras FRP. En Canadá, los ingenieros civiles han documentado los procesos de diseño en el Reglamento de Diseño de Puentes Canadienses para el uso de barras FRP. La Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE) ha publicado reglamentos que tienen recomendaciones de diseño para el uso de barras y tendones FRP. En Europa, el programa Eurocrete ha publicado un reglamento para barras FRP.

### 1.4.3 Criterios de Desarrollo

Alrededor del mundo se están llevando a cabo muchas actividades para la implementación de los materiales y compuestos FRP. La figura 1.4 resume algunas de estas actividades.

A mediados de los 90's, Caltrans fue la primera agencia estatal de los Estados Unidos en llevar a los Compuestos FRP a aplicaciones sísmicas en estructuras de puentes. Caltrans inició un programa de diseño y calificación de materiales para FRP y sistemas usados para reparación, reforzamiento y mejoramiento sísmico de columnas en puentes. Los asesores e ingenieros de Caltrans desarrollaron un protocolo de diseño para el mejoramiento sísmico de columnas. En abril de 1997, la Conferencia Internacional de Oficiales de Construcción (ICBO, International Conference of Building Officials) publicó el AC - 125 Criterio para Reforzamiento de Concreto y Mampostería no reforzada Usando Sistemas de Compuestos de Fibras Reforzadas.

| Criterio/Código                                                                                                           | Referencia                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Código de Construcción Canadiense                                                                                         | Diseño y Construcción de Componentes con Plásticos Reforzados con Fibras                                           |
| Código de Diseño Canadiense para Puente (CHBDC)                                                                           | Estructuras Reforzadas con Fibras                                                                                  |
| Conferencia Internacional de Oficiales de Construcción (ICBO)                                                             | AC - 125 Criterio para reforzamiento de concreto y mampostería no reforzada usando sistemas de Compuestos FRP      |
| Especificación para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (JSCE) | Recomendación para el Diseño y Construcción para Estructuras de Concreto Reforzado usando materiales continuos FRP |

Figura 1.4 Cuadro de Iniciativas y Códigos de Diseño Globales para FRP

Fuente: Product Selection Guide: FRP Composites Products for Bridge Applications, Market Development Alliance, 2001

### 1.4.4 Transmisión de la Tecnología

Instituciones académicas de todo el mundo, han estado haciendo activamente investigación que involucre aplicaciones de FRP a la infraestructura civil. Muchas universidades se han distinguido como centros de excelencia en campos de estudio específicos. Existe una gran lista de estas universidades, así como de centros especializados. Según la Alianza para el Desarrollo del Mercado de los Compuestos FRP algunas son:

- Universidad Estatal de Iowa
- Universidad Estatal de Kansas
- Universidad Tecnológica Lawrence
- Universidad Estatal de Oregon
- Universidad Estatal de Pensilvania
- Universidad de California en San Diego
- Centro Nacional de Compuestos de los EUA (NCC)
- Real Colegio Militar de Canadá
- Centro de Servicio para la Ingeniería Naval de los EUA (NFESC)
- Servicio Forestal de los EUA
- Departamentos de Transporte de los estados de EUA (DOT's)

Y muchas otras, en México la Universidad Nacional Autónoma de México, a través de la Facultad de Ingeniería y la Sección Centro y Sur de México del ACI a través del Capítulo Estudiantil del ACI en la UNAM, se encuentran liderando los esfuerzos para el desarrollo de los Compuestos FRP aplicados a la ingeniería civil en México.

Asimismo, las organizaciones mencionadas anteriormente, tienen una serie de publicaciones que facilitan la transmisión del conocimiento de la tecnología de los Compuestos FRP. A continuación se muestra un cuadro sobre estas publicaciones.

| Organización                                                       | Publicación/Actividad                                                          |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE)                    | Revista de Compuestos para la Construcción                                     |
| Instituto Americano del Concreto (ACI)                             | Revista de Materiales Estructural<br>Revista                                   |
| Administración Federal de Carreteras (FHWA)                        | IFA - 21 Programa de Construcción e Investigación de Puentes (IBRC)            |
| ISIS de la Red de Centros de Excelencia Canadienses                | Investigación y colaboración entre gobiernos, academias e industrias en Canadá |
| Alianza para el Desarrollo del Mercado de los Compuestos FRP (MDA) | Equipos y Programas de Proyecto                                                |
| SAMPE                                                              | Revista de Materiales Avanzados                                                |

Figura 1.5 Organizaciones que facilitan la transferencia de tecnología

Fuente: Product Selection Guide: FRP Composites Products for Bridge Applications, Market Development Alliance, 2001

La Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration, FHWA) a través del Programa de Construcción e Investigación de Puentes Innovadores (IBRC) ha desarrollado nuevos materiales para la construcción con ventajas de reducir el mantenimiento y costos de los puentes.

## 1.5 Materiales Compuestos

---

### 1.5.1 Definición

No todos los plásticos son Compuestos FRP. De hecho, la mayoría de plásticos hoy en día son puro plástico, como los juguetes o las botellas de refresco. Cuando se necesita una resistencia adicional, se pueden reforzar muchos tipos de plásticos (usualmente con fibras de refuerzo). La combinación de un plástico y un refuerzo puede producir algunos de los materiales más fuertes por su peso (relación resistencia/ peso) y los más versátiles que la tecnología nunca haya desarrollado.

Los Compuestos de Fibras de Refuerzo con Polímeros (FRP) están definidos como una matriz de polímeros, termofija o termoplástica, que es reforzada con fibras u otros materiales de refuerzo con una suficiente relación de aspecto longitud – diámetro para proveer una función de refuerzo discernible en una o más direcciones. Los Compuestos FRP son diferentes de los materiales tradicionales para construcción, tales como el acero o el aluminio. Los Compuestos FRP son anisotrópicos (las propiedades sólo aparecen en la dirección donde se aplica la carga), mientras que el acero y el aluminio son isotrópicos (las propiedades son uniformes en todas direcciones, independientemente de la aplicación de la carga). De esta manera, las propiedades de los Compuestos FRP son direccionales, esto quiere decir, que las mejores propiedades mecánicas se encuentran en la dirección longitudinal de la fibra. Los Compuestos son similares al concreto reforzado donde la barra esta embebida en el concreto.

Existen muchos términos que son usados para definir a los compuestos FRP. Se usan algunos calificativos para identificar a las fibras específicamente, por ejemplo, Fibras de Refuerzo con Polímeros – Vidrio (FRPV), Fibras de Refuerzo con Polímeros -Carbono (FRPC) y Fibras de Refuerzo con Polímeros – Aramida (FRPA). Otro término familiar usado son Fibras de Refuerzo con Plásticos y comúnmente se les llama Plásticos Reforzados con Fibras. Han sido usadas otras siglas y frecuentemente dependen de la ubicación geográfica, tal como Compuestos Reforzados con Fibras (FRC), Plásticos Reforzados con Vidrio (GRP) y Compuestos de Matriz de Polímero (PMC). Todos los nombres mencionados anteriormente tienen el mismo significado: Compuestos FRP.

En la figura siguiente se muestran algunas formas estructurales de los compuestos FRP, que son utilizados para reforzar concreto.

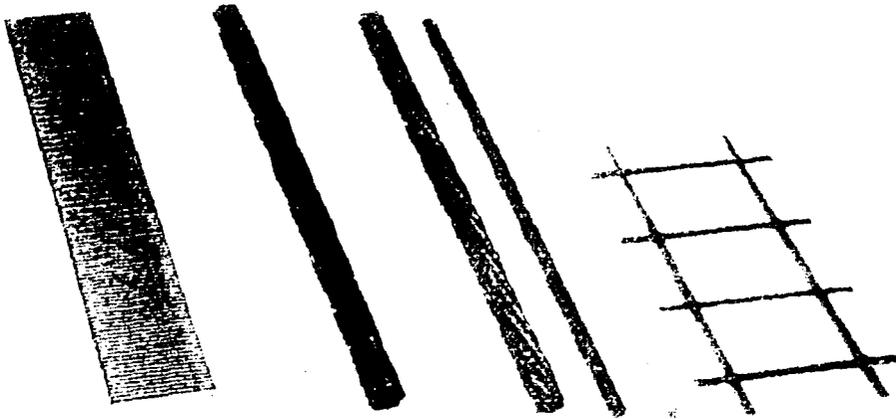


Figura 1.6 Diferentes formas de compuestos FRP

### 1.5.2 Beneficios

Los Compuestos FRP ofrecen muchos beneficios, que dependen de su selección y uso. La selección de los materiales depende del perfil y la intención de uso del producto. El diseñador de compuestos puede hacer a la medida el perfil del producto terminado con una apropiada selección de materiales. Es importante para el usuario final entender la aplicación ambiental, las cargas y los requerimientos de durabilidad del producto. Como beneficios se pueden listar los siguientes:

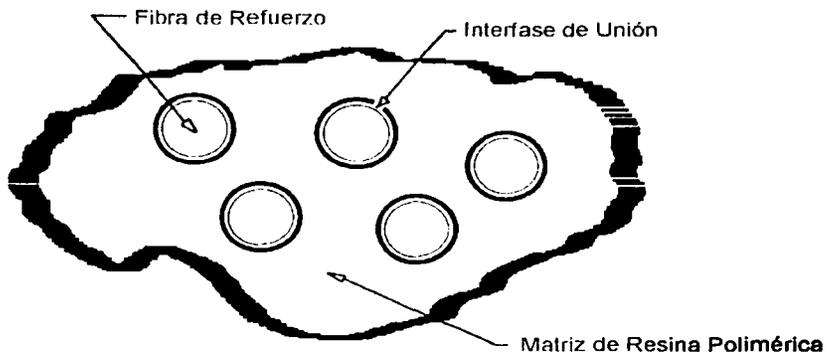
- Ligero
- Alta relación esfuerzo/ peso
- Esfuerzo Direccional
- Resistencia a la Corrosión
- Resistencia al clima
- Estabilidad Dimensional
  - Baja conductividad térmica
  - Bajo coeficiente de expansión **térmica**
- No magnético
- Transparencia a ondas de radar
- Aislante
- Bajo mantenimiento
- Gran durabilidad
- Consolidación de partes
- Posibles partes geométricas **pequeñas o muy grandes**
- Se le puede dar el terminado deseado.
- Alta resistencia a impacto.

### 1.5.3 Composición

Los Compuestos están conformados por resinas, refuerzos, materiales de relleno o cargas, y aditivos. Cada uno de estos materiales o ingredientes, tiene un papel muy importante en el proceso y perfil del producto final. La resina o polímero es el "pegamento" que mantiene unido al compuesto y da las propiedades físicas del producto final. El refuerzo provee el esfuerzo mecánico. Los materiales de relleno o cargas y aditivos son usados como proceso o para dar propiedades especiales al producto final. La figura 1.7 nos muestra la configuración microscópica de un compuesto.

Las propiedades mecánicas y composición de los Compuestos FRP pueden ser hechos de acuerdo a la intención de uso. La cantidad y tipo de los materiales seleccionados, adicionalmente del proceso de fabricación, afectan a las propiedades mecánicas y a su desempeño. Algunas consideraciones importantes para el diseño de productos compuestos son:

- Tipo de fibra de refuerzo
- Porcentaje de fibra o Volumen de Fibras
- Orientación de la fibra ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$  o la combinación de éstas)
- Tipo del sistema de resina
- Costo del producto
- Proceso de fabricación
- Volumen de producción (para determinar el mejor método de producción)
- Condiciones de servicio



**Figura 1.7** Estructura de un compuesto a nivel micro – mecánico

Fuente: SPI Composites Institute, 1994

### 1.5.4 Refuerzos

La primera función de las fibras o refuerzos es tomar la carga a través de la longitud de la misma fibra para dar resistencia y rigidez en la dirección de la fibra. Los refuerzos pueden ser orientados para dar las propiedades deseadas en la dirección de la aplicación de la carga. Los refuerzos pueden ser artificiales o naturales, muchos materiales son capaces de reforzar a los polímeros. Algunos materiales naturales son la celulosa de la madera, pero los usados frecuentemente, son artificiales. De todos los refuerzos existentes, el que mayor volumen de utilización ha tenido hasta ahora es la fibra de vidrio. Otros materiales que se utilizan son el carbono, aramida, polietileno de muy alto peso molecular, polipropileno, poliéster y nylon. Las fibras de carbono son algunas veces referenciadas como fibras de grafito. Las diferencias entre ellas, no son relevantes desde el punto de vista introductorio, estas diferencias son en base a la naturaleza del material y la temperatura a la cual la fibra es hecha. Los refuerzos más especializados para altas resistencias y altas temperaturas se fabrican con metales y óxidos de metales como los usados para la industria aeronáutica y espacial.

En un principio, los únicos refuerzos disponibles para la fabricación de los compuestos, eran textiles tradicionales y sus derivados. Particularmente en el caso de la fibra de vidrio, la experiencia mostró que para el tratamiento químico del acabado o el almidonado, requería de un proceso a estos materiales para transformarlos en textiles o telas y otras capas fueron perjudiciales para la adhesión de los polímeros compuestos en el acabado de las fibras. Se desarrollaron técnicas para remover estos materiales, principalmente por continuidad o limpieza por calor. Después fue necesario aplicar nuevos agentes de unión (también conocidos como terminados o tratamiento de superficie), un ingrediente importante en el sistema de almidonado para facilitar la adhesión de los polímeros a las fibras, particularmente bajo condiciones húmedas y en el proceso de la fibra.

A la mayoría de los refuerzos, tanto para resinas termofijas como termoplásticas, se les da la forma de los tratamientos de acabado, tanto en la fabricación de la fibra como en los tratamientos subsecuentes. Otros materiales aplicados a las fibras en la forma de ser producidas, son las resinas cementantes que sirven para mantener las fibras unidas en manojos y los lubricantes que sirven para proteger a las fibras de la degradación causada por el proceso de abrasión.

#### 1.5.4.1 Fibras de Vidrio

Conformados por la composición de alúmina - cal - boro silicato, la fibra de vidrio "E" es considerada con el refuerzo predominante para los compuestos de matriz polimérica, debido a sus propiedades de alto aislamiento eléctrico. Otra composición comercial, es la fibra de vidrio "S", con más alta resistencia, resistencia al calor y algunos refuerzos de fibra de vidrio especializados, como la fibra de vidrio AR (álcali resistente).

Las fibras de vidrio para los compuestos reforzados, generalmente se producen en diámetros que van de los 0.009 mm a los 0.023 mm. Las fibras son hechas a muy altas velocidades (aproximadamente a 320 kilómetros por hora), se pasan a través de pequeños orificios acojinados, en donde se establece el diámetro y son a la vez calentadas eléctricamente. Estos pequeños orificios acojinados o cojinetes forman filamentos individuales, los filamentos

son juntados en grupos o en manojos llamados "trenzas". Los filamentos son removidos de los cojinetes con agua y aire frío, después son recubiertos por un cementante químico determinado o almidón para proteger los filamentos y aumentar las propiedades del compuesto. El almidón también determina las características del proceso de las fibras de vidrio y las condiciones de la interfase matriz - fibra del compuesto.

El vidrio es por lo general una fibra de buena resistencia al impacto pero pesa más que el carbono y la aramida. Las fibras de vidrio tienen excelentes características de resistencia, igual o mejor que el acero en cierta forma. Su bajo módulo requiere de tratamiento en diseños especiales donde la rigidez es crítica. Los compuestos hechos con este material, exhiben muy buenas propiedades aislantes tanto térmicas como eléctricas. Las fibras de vidrio son también transparentes a la radiación de la frecuencia de radio y son usadas para aplicaciones de antenas de radar.

#### 1.5.4.2 Fibras de Carbono

Las fibras de carbono son creadas usando poliacrilonitrilo (PAN), precursores de la brea y las fibras de rayón. Las fibras a base de PAN ofrecen buena resistencia y buen módulo, cuyos valores están arriba de 585 - 620 GPa. También tienen buena resistencia a compresión para aplicaciones estructurales, arriba de 6900 MPa. Las fibras de brea son hechas con petróleo o residuos del carbón. Las fibras de brea tienen extremadamente altos valores de módulo (arriba de 965 GPa) y un coeficiente de expansión térmica favorable que las hacen un material muy usado en aplicaciones espaciales y satelitales. Existe una alternativa más económica, las fibras de brea pueden ser hechas con un valor bajo de módulo. Las fibras de carbono son más costosas que las fibras de vidrio; de cualquier forma las fibras de carbono ofrecen una excelente combinación de resistencia, bajo peso y alto módulo. La resistencia a tensión de las fibras de carbono es igual a las de vidrio, mientras que su módulo es aproximadamente la tercera o cuarta parte más que el del vidrio.

Las fibras de carbono tienen diferentes presentaciones, desde filamentos continuos de hilos jalados hasta fibras cortadas y colchonetas. La alta resistencia y el módulo son obtenidos con el uso de refuerzos continuos unidireccionales. Los hilos jalados entrelazados de filamentos continuos de carbono contienen de 1.000 a 75.000 filamentos individuales, los cuales pueden ser tejidos o unidos en tejidos de hilos itinerantes y en productos híbridos con fibras de vidrio y aramida. Los compuestos de fibra de carbono son más frágiles (es decir, tienen menor deformación a la falla) que el vidrio y la aramida. Las fibras de carbono pueden causar corrosión galvánica cuando son usados cerca de los metales. Se puede utilizar un material de protección para prevenir esto, tal como el vidrio o la resina.

#### 1.5.4.3 Fibras de Aramida (Poliaramidas)

La fibra de aramida es una poliamida, la cual es una fibra orgánica artificial para compuestos de refuerzo. Las fibras de aramida ofrecen buenas propiedades mecánicas con una baja densidad y con la ventaja de la dureza o la resistencia al impacto. Estas son caracterizadas por tener una alta resistencia a tensión, un módulo mediano, y una muy baja densidad comparada con el vidrio o el carbono. La resistencia a tensión de las fibras de aramida es

mayor que las fibras de vidrio y el módulo es aproximadamente 50% mayor que el del vidrio. Estas fibras aumentan la resistencia al impacto de los compuestos y el resultado son productos con mayores resistencias a la tensión. Las fibras de aramida son aisladores tanto eléctrico como térmico. Estas son resistentes a los solventes orgánicos, combustibles y lubricantes. Las fibras de aramida secas son duras y son usadas como cables o cuerdas, y frecuentemente usadas en aplicaciones balísticas.

## 1.6 Formas de Refuerzo

Indiferentemente del tipo de material, los refuerzos se encuentran disponibles en formas que satisfacen un gran rango de procedimientos y requerimientos de producto final. Los materiales se ofrecen como refuerzos, los cuales son hilo itinerante, fibras molidas, trenzados cortados y continuos o tapetes cortados o termoformables. Los materiales de refuerzo pueden ser diseñados con una arquitectura de fibra única y ser preformados dependiendo de los requerimientos del producto y los procedimientos de fabricación.

### 1.6.1 Hilos Itinerantes

Los hilos itinerantes son utilizados principalmente en compuestos termofijos, pero también pueden ser utilizados en los termoplásticos. El hilo itinerante múltiple consiste en muchos trenzados individuales o manojos de filamentos, los cuales después son cortados y depositados aleatoriamente dentro de la matriz de resina. Procedimientos como el Moldeo por Compresión (Sheet Molding Compound, SMC), en su preforma e impregnación de spray usan el hilo itinerante múltiple. El hilo itinerante simple consiste de muchos filamentos individuales enrollados en una trenza simple. Este producto es generalmente usado en procesos que utilizan un refuerzo unidireccional tal como los filamentos enrollados o por pultrusión.

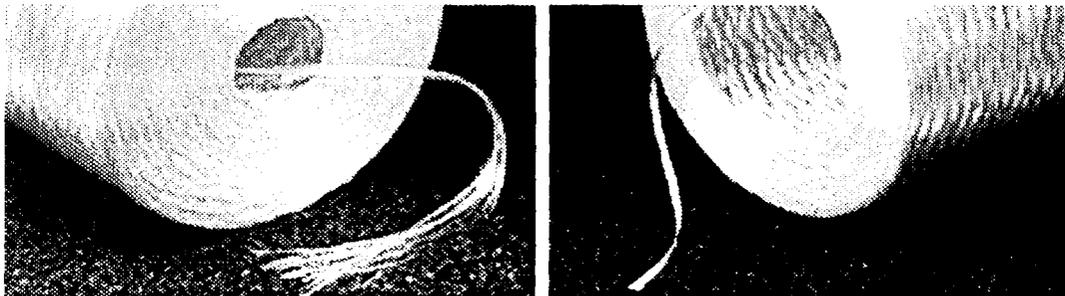


Figura 1.8 Hilo Itinerante Múltiple (izquierda) e Hilo Itinerante Simple (derecha)

Fuente: Catálogo de Productos Owens Corning

### 1.6.2 Colchonetas

Las colchonetas de refuerzo suelen describirse en términos de peso por unidad de área. Por ejemplo, una colchoneta cortada de 2 onzas, pesará 2-onzas por yarda cuadrada. Existen varios tipos de cementante para mantener la colchoneta unida y existen diferencias entre los productos de colchoneta. En algunos procesos – como el de moldeo a mano–, es necesario que el cementante sea disuelto. En otros procesos, particularmente en el moldeo por compresión, el cementante debe resistir las fuerzas hidráulicas y la acción de disolución de la matriz de resina durante el proceso de moldeo. Por lo tanto, se producen dos tipos de colchonetas y son conocidos como solubles e insolubles.

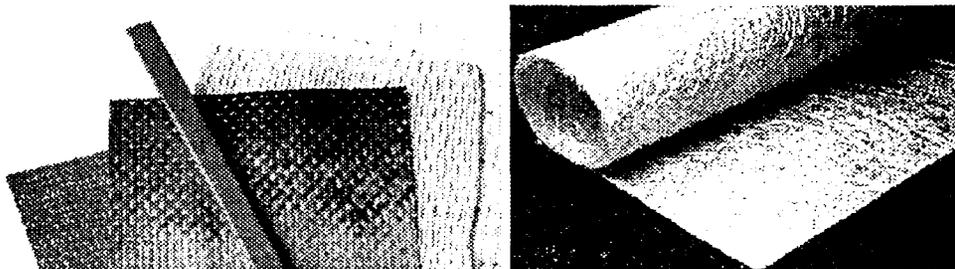


Figura 1.9 Diferentes tipos de colchonetas y telas

### 1.6.3 Telas trenzadas, tejidas y cosidas

Existen muchos tipos de telas que pueden ser usadas como refuerzo, unido con resinas en un compuesto. Los refuerzos multidireccionales son producidos por entrelazado, tejido, cosido, o trenzado de fibras continuas dentro de la tela con hilos tratados y torcidos. Las telas se refieren a todas las láminas horizontales, artículos en rollo, sean o no estrictamente telas. Las telas son producidas utilizando casi la mayoría de las fibras de refuerzo. Las telas más comunes son fabricadas con vidrio, carbono o aramida, éstas se encuentran disponibles en varias configuraciones de tejidos y espesores (desde 0.0254 a 10.16 mm). Las telas ofrecen resistencias orientadas y es un gran refuerzo a la carga, y que frecuentemente tienen aplicaciones de gran desempeño.

Las telas son típicamente presentadas en rollos de 23 a 275 metros de longitud y de 2.5 a 51 centímetros de ancho. La tela debe ser inseparable y lo suficientemente estable para poder ser manejada, cortada y transportada al molde, pero también debe ser lo suficientemente flexible para ajustarse a la forma y al contorno del molde. Con un diseño apropiado, la tela puede permitir una rápida impregnación y saturación de la resina y permanecerá en su lugar una vez que la resina sea aplicada. Algunas telas, vienen con medidas específicas o sistemas de unión que promueven la adhesión al sistema de resinas.

Las telas permiten reforzar un área específica, esto no puede ser hecho con fibras molidas y sólo es posible con hilos trenzados continuos usando un equipo muy caro de colocación de fibras. Debido a la naturaleza continua de las fibras en la mayoría de las telas, la relación resistencia - peso es mucho mayor que aquellas fibras que son cortadas. Las telas cosidas permiten personalizar la orientación de la fibra como una estructura. Esto puede ser una gran ventaja cuando se diseña para deformación o estabilidad a la torsión.

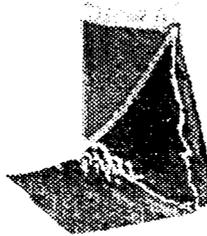


Figura 1.10 Tela de fibra de carbono

Las telas tejidas son fabricadas en telares en una gran variedad de pesos, tejidos y espesores. En un tejido, cada hilo itinerante es cruzado alternadamente por arriba y por debajo de cada fibra paralela, permitiendo a la tela ser mas cubierta y se ajuste a las superficies curvas. Las telas tejidas son producidas cuando los trenzados de fibra son colocados en ángulos rectos hacia la otra mitad ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ). Las telas tejidas son usadas comúnmente para la fabricación de botes.

Los tejidos cosidos, también conocidos como no ondulados, han optimizado sus propiedades de resistencia por la arquitectura de su fibra. Las telas tejidas consisten en dos capas de fibras continuas entrelazadas las cuales están orientadas en un patrón de ángulo de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , donde las fibras son onduladas y no rectas. Las telas cosidas son producidas ensamblando capas sucesivas de fibras alineadas. Por lo general, las orientaciones de las fibras incluyen la dirección  $0^\circ$  (Urdimbre o pie),  $90^\circ$  (Tramado o relleno), y  $+45^\circ$  (Inclinadas). Una vez que se han colocado todas las capas, son cosidas todas juntas. Este tipo de formación permite un flujo de resina optima cuando los Compuestos son fabricados. Estas telas han sido usadas tradicionalmente en los cascos de lanchas por 50 años. Algunas otras aplicaciones que se les ha dado son postes ligeros, aspas para turbinas, camionetas, autobuses y tanques enterrados. Estas telas son usadas actualmente en las cubiertas de puentes y algunos sistemas de reparación de columnas. Las orientaciones múltiples dan un refuerzo casi isotropo.

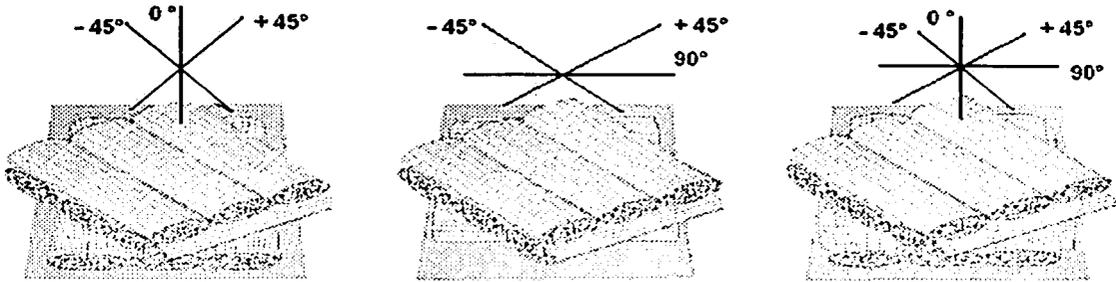


Figura 1.11 Telas Cosidas Triaxiales y Cuadriaxiales

Las telas trenzadas son construidas con un sistema de dos o más hilos entrelazados en tal manera que todos los hilos están enganchados para tener una distribución de carga óptima. Las trenzas biaxiales dan un refuerzo en la dirección inclinada sólo con ángulos de fibra que van desde los  $\pm 15^\circ$  hasta los  $\pm 95^\circ$ . Los trenzas triaxiales dan el mismo refuerzo en la orientación inclinada con ángulos de los  $\pm 10^\circ$  hasta los  $\pm 80^\circ$  y en dirección axial ( $0^\circ$ )

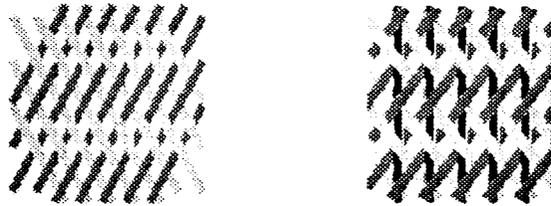


Figura 1.12 Telas trenzadas Biaxial (izquierda) y Triaxial (derecha)

#### 1.6.4 Tejido 3D

Un tejido 3D utiliza un proceso de tejido especial que ata múltiples capas y fibras multiaxiales con hilos "Z". Estos hilos son perpendiculares tanto a las urdimbres o pies como a los tramados. Como resultado, la unidad de espesor del tejido multicapa es dada durante el ciclo de tejido. La fibra "Z" da la integridad al tejido. Esta tecnología es capaz de hacer formas para paneles y perfiles estructurales.

La rectitud libre de ondulaciones de las fibras mejora su resistencia bajo carga, dando una buena resistencia al impacto y a la transferencia de energía, así como mejorar las propiedades mecánicas en todas direcciones.

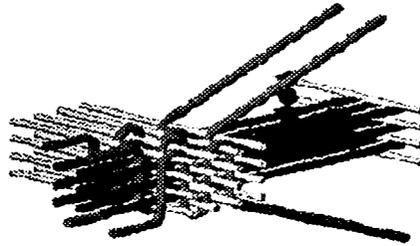


Figura 1.13 Proceso de tejido de la Tejido 3-D

### 1.6.5 Refuerzo Unidireccional

Los refuerzos unidireccionales incluyen las cintas, hilos jalados – racimo de filamentos continuos no torcidos –, hojas unidireccionales de hilos jalados e hilos itinerantes (los cuales son colecciones de fibras o trenzados). Las fibras en esta forma están todas alineadas paralelamente en una dirección y aplanadas para dar las mayores propiedades mecánicas. Los Compuestos utilizan cintas o láminas unidireccionales que tienen una gran resistencia en la dirección de la fibra. Las láminas unidireccionales son delgadas y para aplicaciones estructurales se necesita poner varias capas.

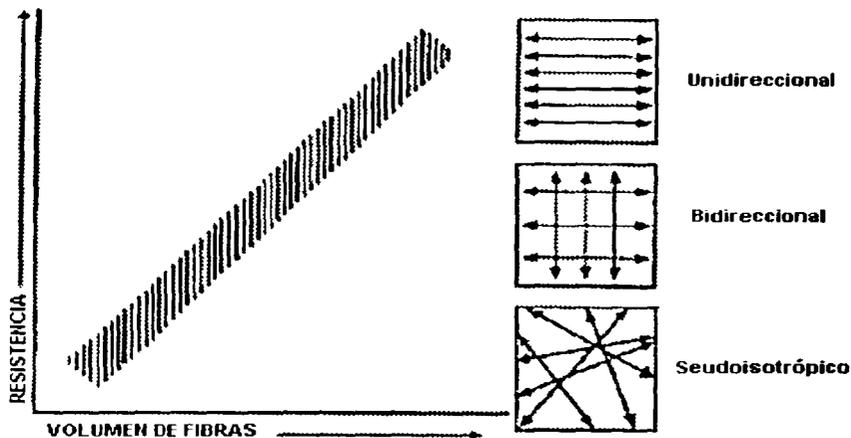


Figura 1.14 Relación de Resistencia – Volumen de Fibra y Orientación de la Fibra

Es necesario, en algunos compuestos dar una barrera adicional contra el clima o la corrosión a la superficie del producto. Un velo, es un producto hecho de vidrio "C", vidrio "E", nylon o poliéster que actúan como una gran esponja delgada que puede absorber resina hasta un 90% de su volumen. Esto ayuda a dar una capa extra de resina que protege a la superficie del producto. Los velos de la superficie son usados para mejorar la apariencia de la superficie y asegurar la presencia de una barrera resistente contra la corrosión en los productos de compuestos típicos como tubos, tanques y otros equipos de procesos químicos. Algunos otros beneficios son el aumento de la resistencia a la abrasión, rayos UV y otras fuerzas del ambiente. Los velos pueden ser usados en conjunto con los recubrimientos de gel que refuerzan a la resina.



Figura 1.15 Velo de Fibra de Vidrio

### **1.6.6 Prepreg**

Los prepreg son un material prefabricado compuestos por una forma de refuerzo y una matriz de polímero. Las fibras de refuerzo o telas pasan a través de un baño de resina que hacen un prepreg. La resina es saturada (impregnada) dentro de la fibra y después calentada para alcanzar la reacción de curado en diferentes pasos sin llegar al curado total. Los prepreg termofijos o termoplásticos pueden ser almacenados en un refrigerador o a temperatura ambiente dependiendo de los materiales. Los prepreg pueden ser aplicados manualmente o mecánicamente en varias direcciones basadas en los requerimientos de los materiales.

Las propiedades mecánicas de los Compuestos FRP dependen del tipo, cantidad y orientación de la fibra que ha sido seleccionada para un servicio en particular. Existen muchas formas de refuerzo disponibles en el mercado para cumplir con los requerimientos del usuario. La habilidad de la mano de obra de la fibra permitirá un desarrollo óptimo para que pueda reflejarse el producto en su peso y costo.

## 1.7 Resinas

La función principal de la resina es transferir la carga entre las fibras de refuerzo, actúa como un pegamento para mantener las fibras unidas, y proteger las fibras del daño ambiental y mecánico. Las resinas están divididas en dos grandes grupos conocidos como termofijas y termoplásticas. Las resinas termoplásticas se convierten en ligeras cuando se calientan, pueden ser moldeadas o dar la forma deseada mientras se encuentre en el estado semifluido y se vuelve rígido cuando se enfría. Por otra parte, las resinas termofijas, son usualmente líquidas o sólidas con bajo punto de ebullición en una forma inicial, cuando se utilizan para producir bienes terminados, estas resinas termofijas son curadas con el uso de un catalizador, calor o la combinación de ambos. Una vez curadas, las resinas termofijas sólidas no pueden ser regresadas a su forma líquida original. A diferencia de las resinas termoplásticas, una vez curadas las resinas termofijas no se pueden derretir, por consecuencia no fluyen, pero se reblandecen cuando se calientan (y pierden la rigidez) y una vez formadas no se puede modificar su forma. La Temperatura de Deflexión (HDT, Heat Deflection Temperature) y la Temperatura de Transición del Vidrio (Tg, Glass Transition Temperature) son usadas para medir el reblandecimiento de una resina curada. Los métodos de prueba (HDT y Tg) miden diferentes características de una temperatura aproximada cuando la resina curada se reblandece significativamente para fluir (flexión y pandeo) bajo carga.

Las resinas termofijas más comúnmente usadas en la industria de los Compuestos son los poliéster no saturados, epóxicos, viniléster y fenólicos. Existen diferencias entre estos grupos que deben ser comprendidas para hacer la elección apropiada del material para una aplicación específica.

### 1.7.1 Resina Poliéster

Las resinas de poliéster no saturadas son el pilar de la industria de los compuestos y representa aproximadamente el 75% del total de las resinas usadas. Los poliéster son producidos por la polimerización condensada de ácidos dicarboxílicos y alcoholes disfuncionales (glicoles). Además, los poliéster no saturados, contienen un material, como el anhídrido málico o el ácido fumárico, como parte del componente ácido dicarboxílico. El polímero final es disuelto en un monómero reactivo tal como el estireno para dar un líquido de baja viscosidad. Cuando esta resina es curada, el monómero reacciona con las partes no saturadas en el polímero convirtiéndolo en una estructura termoestable sólida.

Existe una gran cantidad de materiales sin procesar y técnicas que nos permiten alcanzar las propiedades deseadas en la formulación o procesamiento de la resina de poliéster. Los poliéster son versátiles debido a su capacidad de ser modificados o trabajados durante la construcción de las cadenas de polímeros. Estos han encontrado una variedad ilimitada de usos en todos los segmentos de la industria de los compuestos. La principal ventaja de estas resinas son las propiedades de estabilidad que tienen (incluyendo las mecánicas, químicas y eléctricas), de estabilidad estructural, costo y fácil manejo, y fabricación.

Los poliésteres no saturados se dividen en clases, dependiendo de su estructura básica. Algunos de los ejemplos más comunes son el ortoftálico (orto), isoftálico (iso), dicitropentadieno (DCPD) y bisfenol. Además, las resinas poliéster son clasificadas de acuerdo a las aplicaciones de uso final, a esta clasificación se le llama Propósito General (GP).

El término "propósito general" no se refiere a la clasificación de una resina poliéster en particular, sino que define el producto que es relativamente bajo en costo, ofrece un buen desarrollo mecánico y eléctrico, y da pasos de fabricación bien definidos. La mayoría de las resinas orto y DCPD, así como algunas iso caen dentro de la categoría GP.

Debido a que los poliéster pueden ser tratados químicamente para cumplir con los requerimientos de aplicación, un gran número de poliésteres especiales se encuentran disponibles, como: Poliésteres flexibilizados, de grado eléctrico, de resistencia a la corrosión, de resistencia al calor, retardante de fuego y translúcidos.

Por lo general, los poliésteres especiales, derivan su desempeño del maquillaje químico del polímero. Los perfeccionamientos en una propiedad, como la resistencia química puede también perfeccionar otras propiedades, tal como la resistencia a la temperatura. Las resinas poliéster líquidas pueden ser fácilmente enviadas a los fabricantes, quienes realizan la forma final y el curado de productos. El mecanismo de curado es la reacción entre el no saturante en el poliéster y el monómero estireno. Un uso apropiado de los aditivos es que pueden lograr resistencia al fuego y un buen desempeño a la fatiga.

### *1.7.2 Resinas Epóxicas*

Las resinas epóxicas tienen establecido un buen registro en un gran número de partes de los compuestos, estructuras y reparación de concreto. La estructura de la resina puede ser diseñada para construir productos diferentes con niveles variables de perfil. El mayor beneficio de las resinas epóxicas sobre las de poliéster no saturadas es su baja contracción. Las resinas epóxicas pueden también ser fabricadas con diferentes materiales o unidas con otras resinas para alcanzar un perfil específico. Los estándares de curado pueden ser controlados para igualar los requerimientos de proceso a través de la selección apropiada de endurecedores o catalizadores. Generalmente, los epóxicos son curados con la adición de anhídrido o un endurecedor de amina como un sistema de dos partes. Existen otros tipos de endurecedores que de la misma forma producen diferentes curados y dan diferentes propiedades al compuesto terminado.

Las resinas epóxicas son usadas principalmente para la fabricación de compuestos de alto desempeño con propiedades mecánicas superiores, resistencia a los líquidos corrosivos y ambientales, propiedades eléctricas superiores, buen desempeño a temperaturas elevadas, buena adhesión o la combinación de todos estos beneficios. Además, tienen una resistencia particularmente buena a los rayos UV. Cuando la viscosidad del epóxico es más alta que las resinas poliéster, se requiere de un post curado (calor elevado) para obtener las propiedades mecánicas últimas, haciendo a los epóxicos más difíciles de usar.

Las resinas epóxicas son usadas con un gran número de fibras de refuerzo, incluyendo vidrio, carbono y aramida. Estas últimas, son usadas muy poco por su alto costo, y sólo se usan cuando los requerimientos demandan grandes resistencias o grandes rigideces. Los epóxicos son compatibles con casi todos los procesos de manufactura de compuestos, particularmente, moldeo a vapor, moldeo en autoclave, moldeo a presión, moldeo a compresión, enrollamiento de filamentos y manual.

### *1.7.3 Resinas Viniléster*

Las resinas viniléster fueron desarrolladas al combinar las ventajas de las resinas epóxicas con el mejor manejo y curado rápido, típico para las resinas poliéster no saturadas. Estas resinas son producidas por resinas epóxicas reactivas con acrílico o ácido metacrílico. El material resultante es disuelto en estireno para alcanzar un líquido que es muy similar a la resina poliéster. Los viniléster son curados también con los convencionales peróxidos orgánicos usados en las resinas de poliéster. También ofrecen dureza mecánica y excelente resistencia a la corrosión.

### *1.7.4 Resinas Fenólicas*

Las resinas fenólicas son una clase de resina comúnmente basadas en fenol (ácido carbólico) y formaldehído. Los fenólicos son resinas termofijas que se curan a través de reacción condensada produciendo agua que debiera ser removida durante el proceso. La pigmentación está limitada a rojo, café y negro. Los compuestos fenólicos tienen muchas propiedades deseables como resistencia a altas temperaturas, resistencia a la degradación, excelente aislamiento térmico, resistencia a la corrosión y excelentes propiedades contra el fuego y bajo emisión de humos tóxicos. Los fenólicos son usados como pegamentos en las cimbras, por nombrar alguna aplicación.

### *1.7.5 Poliuretano*

El poliuretano es una familia de polímeros con una gran gama de propiedades y usos, todas basadas en la reacción exotérmica de un polisocianatos con un polyols (un alcohol que contiene más de un grupo de hidroxilos). La versatilidad del poliuretano permite diseñar la resina de poliuretano para alcanzar las propiedades deseadas.

Los poliuretanos aparecen en una gran variedad de formas. Estos materiales nos rodean a todos nosotros, representando un papel muy importante en muchas facetas de nuestra vida diaria, quizás más que cualquier otro simple polímero. Son usados como recubrimientos, elastómero, espuma o adhesivo. Cuando se usa como recubrimiento en acabados exteriores e interiores, los poliuretanos son duros, flexibles, resistentes químicos y de rápido curado. Los

poliuretanos como elastómero tienen una dureza y abrasión superior, sus aplicaciones son en llantas, defensas o aislantes. Existen muchas combinaciones de espuma de poliuretano para optimizar la densidad para el aislamiento, paneles estructurales y componentes arquitectónicos. Los poliuretanos son frecuentemente usados para unir las estructuras de materiales compuestos. Algunos beneficios del poliuretano como adhesivo son que tiene una buena resistencia al impacto, la resina cura rápidamente y se adhiere muy bien a una infinidad de superficies como el concreto.

Las resinas en compuestos termofijos son una importante fuente de propiedades y características de fabricación. Una de las grandes ventajas del diseño en los compuestos es la gran variedad de resinas que existen. Para hacer un buen uso de estas alternativas, los diseñadores y productores deben familiarizarse con las propiedades, ventajas y limitaciones de cada resina común. Es muy frecuente, usar como fuentes a los laboratorios de los productores de resinas para determinar la mejor resina para una aplicación en particular.

## 1.8 Materiales de Relleno o Cargas

---

El uso de materiales de relleno o cargas en los compuestos va en aumento. Los materiales de relleno no sólo reducen el costo de los compuestos, sino también dan mejoras que de otra manera no podrían ser obtenidas con el refuerzo y las resinas solas. Los materiales de relleno pueden mejorar las propiedades mecánicas al fuego y al humo reduciendo el contenido orgánico de las láminas de compuestos. Además, las resinas rellenas, se contraen menos que las resinas no rellenas, es por esto que se mejora el control dimensional de las partes moldeadas. Algunas de sus propiedades importantes son la resistencia al agua, al ambiente, superficies lisas, rigidez, estabilidad dimensional y resistencia a la temperatura, todas estas pueden ser mejoradas con un uso apropiado del material de relleno.

Las resinas termofijas es un segmento de la industria de los compuestos que ha tomado ventaja de las propiedades de los materiales de relleno por muchos años. Recientemente, la industria termoplástica ha empezado a hacer un amplio uso de los materiales de relleno inorgánicos.

### *1.8.1 Tipos de materiales de relleno o cargas*

Existe un gran número de materiales de relleno inorgánicos que pueden ser usados con los compuestos:

- El Carbonato de Calcio es el material de relleno inorgánico más usado. Se encuentra disponible a un bajo costo en una variedad de tamaños y con muchos fabricantes regionales en Estados Unidos, especialmente para aplicaciones a compuestos. La clase más común de

material de relleno de carbonato de calcio es derivado de piedra caliza o mármol y es muy común en partes automotrices.

- El Caolín (silicato aluminoso hidratado) es el segundo material de relleno más comúnmente usado. Es conocido también en la industria por su nombre de material, arcilla. Las arcillas minadas son procesadas por flotación de aire y lavamiento con agua para remover las impurezas y clasificar el producto para su uso en los compuestos. Existe una gran cantidad de tamaños disponibles.
- El trihidrato de alúmina es frecuentemente usado cuando se necesita mejorar el desarrollo al fuego y humo. Cuando es expuesto a altas temperaturas, este material de relleno expulsa agua (hidratación), por esto se reduce la extensión de flama y el desarrollo del humo. Las aplicaciones de los compuestos en el arreglo de instalaciones, tales como tubos hidráulicos en baños, regaderas y productos relacionados contienen trihidrato de alúmina para este propósito.
- El sulfato de calcio es el mayor material de relleno retardante de flama y humo usado en la industria de los tubos y las bañeras. Este material de relleno mineral ofrece un bajo costo como retardante de flama y humo.

Otros materiales de relleno comúnmente usados son:

- Mica
- Talco
- Fibras de Vidrio Molido
- Sílice
- Microesferas de Vidrio
- Feldespato
- Pedazos de Vidrio
- Otros productos de micro esferas

### *1.8.2 Uso de materiales de relleno en los compuestos*

Cuando se usan láminas de compuestos, los materiales de relleno inorgánicos pueden tener del 40 al 65% del peso en compuestos no estructurales. En comparación con las resinas y los refuerzos, los materiales de relleno son el ingrediente menos caro. Estos materiales son, sin embargo, importantes para el establecimiento del perfil de las láminas de compuesto por las siguientes razones:

- Los materiales de relleno reducen la contracción de la parte del compuesto.
- Los materiales de relleno incrementan la resistencia al fuego de las láminas.
- Los materiales de relleno son un componente que reduce costos, ya que se diluyen con el componente mas caro que es la resina y pueden reducir las cantidades de refuerzo que requiere.
- Los materiales de relleno funcionan para transferir los esfuerzos entre los componentes estructurales principales de la lámina, por esto se mejora el desarrollo mecánico y físico.

- La uniformidad de la lámina puede ser incrementada por el uso efectivo de los materiales de relleno.
- La resistencia al agrietamiento, así como su prevención pueden mejorar con sistemas de resinas de relleno, particularmente en las esquinas y áreas con mucha resina donde las partículas pequeñas en el material de relleno ayudan a reforzar la resina en estas regiones.
- La combinación de partículas medianas y pequeñas del material de relleno ayudan al control reológico a elevadas temperaturas y presiones, ayudando a asegurar que esas partes moldeadas a compresión sean uniformes.
- Los materiales de relleno de baja densidad son usados exclusivamente en masillas marítimas y en la industria de la transportación. Estos ofrecen un menor costo, sin incrementar el peso que afecta el perfil del producto final.

### *1.8.3 Tratamientos de la superficie*

Algunos materiales de relleno son modificados químicamente para tratar el área de la superficie con un agente de unión. Estos agentes de unión ayudan a mejorar la adhesión química entre la resina y el material de relleno y puede reducir la demanda de resina.

El uso efectivo de los materiales de relleno en los compuestos puede mejorar el desarrollo y reducir costos. Un sistema de relleno da muchas propiedades diferentes para el compuesto tales como la supresión de la flama y humo, control de contracción, manejo del peso y mejoramiento de las propiedades físicas.

## **1.9 Aditivos y Modificadores**

---

### *1.9.1 Función de los Aditivos*

Una amplia variedad de aditivos son usados en los compuestos para modificar las propiedades de los materiales y poder trabajar el perfil del laminado. Además, estos materiales son generalmente usados en una cantidad relativamente baja comparada con el peso de las resinas, refuerzos y materiales de relleno, ellos pueden acrecentar el desempeño, como:

- Superficies lisas con baja contracción se pueden obtener cuando una resina termoplástica especial, la cual modera la contracción de la resina, es puesta a las resinas termofijas.
- La resistencia al fuego puede alcanzarse a través de una resina apropiada, usando materiales de relleno especiales y adicionando aditivos retardantes de flama. Incluidos en esta categoría se encuentran los materiales que contienen trióxido de antimonio,

bromo, cloro, borato y fósforo.

- La capacidad para liberar aire puede ser mejorada con el uso de un aditivo especial.
- Un control de emisión es alcanzado con el uso de supresores de emisiones de estireno que tiene emisiones bajas para cumplir con la calidad del aire particularmente en moldes abiertos.
- El control de la viscosidad es frecuentemente logrado combinando un aditivo humedecedor y un dispersante. Estos aditivos facilitan el rociado y la dispersión de los materiales de relleno resultando una baja viscosidad.
- La conductividad eléctrica es posible con la adición de metal, partículas de carbono o fibras conductivas a la matriz del compuesto. La capa protectora para la interferencia electromagnética se logra con la incorporación de materiales conductores.
- La dureza se da con un aditivo especial como cierta goma u otro material elastómero.
- Existe un tipo de aditivos que son diseñados para alcanzar la fabricación de la matriz de resina durante el proceso de manufactura y para dar un mejor funcionamiento específico en el producto final.
- Los Antioxidantes retardan o inhiben la oxidación del polímero y la degradación de éste.
- Los agentes antiestáticos son añadidos a los polímeros para reducir su tendencia a atraer carga eléctrica. El control de la electricidad estática es esencial en ciertos procesos de plásticos y algunas otras operaciones, así como en productos terminados. Las cargas estáticas en plásticos pueden producir shocks, fuego y atraer polvo. El efecto de la carga estática en aplicaciones de informática, por ejemplo, es particularmente perjudicial.
- Los agentes espumantes son químicos que son añadidos durante el proceso para formar celdas a través de la resina. Los plásticos espumosos tienen una baja densidad, costos de material bajos, mejor aislamiento eléctrico y térmico, mejor relación resistencia - peso y contracción reducida.
- Los plastificantes son añadidos a los componentes para mejorar las características de procesamiento y ofrecen un gran rango de propiedades mecánicas y físicas.
- Los agentes bloqueadores dan una lubricación a la superficie. Esto da un reducido coeficiente de fricción en algunas partes de la superficie y hace más fácil el desmoldamiento.
- Los estabilizadores de calor son usados en los sistemas termoplásticos para inhibir la degradación del polímero, resultado de la exposición al calor.
- Los estabilizadores ultravioleta son añadidos para prevenir la pérdida de brillo, tiznado, decoloración, cambios en las características eléctricas y la desintegración debido a la radiación ultravioleta. Los aditivos, que protegen a los compuestos de la radiación UV son llamados absorbedores ultravioleta. Los materiales, que protegen de alguna otra

manera al polímero son conocidos como estabilizadores UV. Estos aditivos, pueden ser usados en compuestos tanto termofijos como termoplásticos.

### *1.9.2 Inhibidores, promotores y catalizadores*

En el poliéster, el aditivo más importante es un catalizador o un iniciador. Por lo general, un peróxido orgánico, como el peróxido de metiletilcetona (MEKP) – que inicia la reacción de polimerización – es usado para curado a temperatura ambiente, o el peróxido benzoico es añadido a la resina para curar a calor en el molde. Cuando es accionado por calor, o usado en conjunción con un promotor de reacción (como es el cobalto) los peróxidos se convierten a un estado reactivo, causando que la resina no saturada reaccione y se vuelva sólida. Algunos aditivos como es el TBC (tertilbútil oftalato) son usados para bajar la reacción y son llamados inhibidores. Los acelerantes como es el DMA (dimentil aniline) realizan un curado rápido.

### *1.9.3 Colorantes*

Los colorantes son comúnmente usados en los compuestos para dar un color a través del elemento. Los aditivos pueden ser mezclados como una parte de la resina o aplicados como parte del moldeado (como un recubrimiento de gel). También hay una gran variedad de recubrimientos que pueden ser aplicados después del moldeado.

### *1.9.4 Agentes Desmoldantes*

Los agentes desmoldantes facilitan la remoción de las partes de los moldes. Estos productos se añaden a la resina, se pueden aplicar al molde, o ambos. El estearato de zinc es el agente desmoldeante más popular que es mezclado en la resina. Ceras, silicones y otros agentes desmoldantes pueden ser aplicados directamente a la superficie de los moldes.

### *1.9.5 Agentes Trioxotrópicos*

En algunos procesos, los cuales son a mano o por inyección, los agentes trioxotrópicos pueden ser usados. Cuando existen agentes trioxotrópicos en la resina se hacen elevadas viscosidades. Esto reduce la tendencia de una resina líquida a fluir o drenar por las superficies verticales. Cuando la resina esta sujeta a un esfuerzo cortante, la viscosidad se reduce, y la resina puede ser fácilmente rociada o aplicada con brocha en el molde. El humo de sílice y ciertas arcillas son agentes trioxotrópicos.

Los aditivos e ingredientes modificadores amplían el uso de los polímeros, acrecentando su procesabilidad o extendiendo su durabilidad. Mientras los aditivos y los modificadores incrementan el costo del material básico, estos materiales pueden ayudar a mejorar la relación costo - funcionamiento.

## 1.10 Materiales Centrales para Estructuras Sándwich

Las estructuras sándwich adheridas han sido un componente básico de la industria de los compuestos por más de 45 años. El concepto de usar materiales relativamente delgados, partes fuertes adheridas a una más delgada y materiales centrales ligeros han permitido a la industria construir estructuras fuertes, rígidas, ligeras y sumamente durables que de otra forma no hubieran sido construidas. Esta tecnología ha sido demostrada en botes, camiones y construcción de paneles. Un incremento en el peso del 3% puede aumentar la resistencia y rigidez en una magnitud de 3.5 veces y 7 veces respectivamente si el núcleo y las capas son escogidos debidamente. La estructura después trabaja más o menos en forma monolítica.

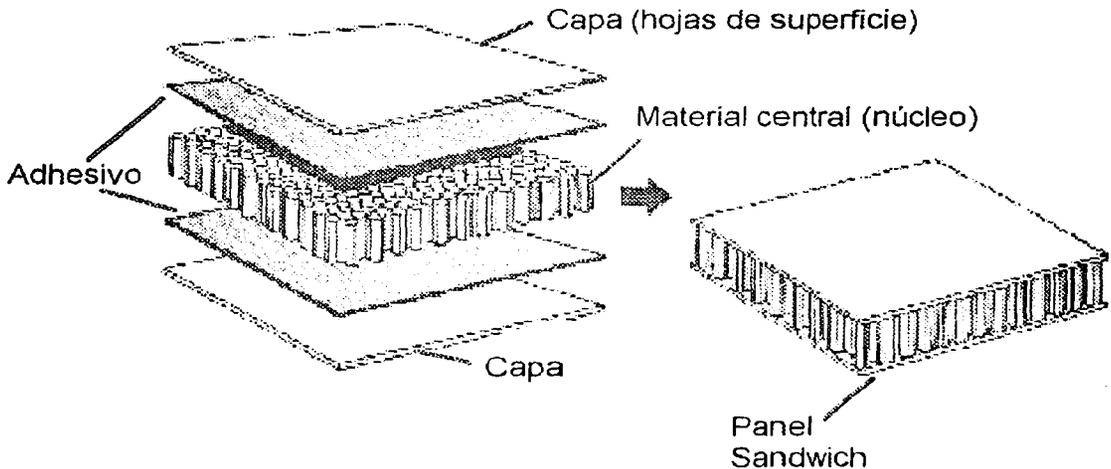


Figura 1.16 Configuración de los paneles sándwich

La comparación más común que se ha hecho es con una viga I. La parte exterior o capas de los paneles, como los patines de la viga I, toman los esfuerzos impuestos por el uso. Los esfuerzos son transferidos entre las capas superiores e inferiores a través de esfuerzos cortantes

que corren a través del alma de la viga I. El propósito de una viga I es disminuir el peso requerido para soportar una carga a flexión. Cuando el esfuerzo máximo es llevado a los patines – superior e inferior – de la viga I, la sección central puede ser mucha más estrecha en espesor en relación con los patines. En una estructura intercalada o sándwich, el núcleo tiene generalmente el mismo espesor y largo que las capas, pero puede ser más débil que éstas cuando empieza a experimentar los esfuerzos cortantes. Se debe tener cuidado en el diseño para asegurar que la capacidad de transferir el esfuerzo cortante de las cargas esperadas no exceda al núcleo ni al adhesivo.

Las hojas de la superficie pueden ser casi de cualquier material. En la industria de los compuestos, los más comunes son de vidrio o carbono. Los materiales del núcleo más comunes son hule espuma, espuma, panal (honeycomb), y madera balsa. Algunos materiales del núcleo pueden ser moldeados, tal como un barquillo o corrugado para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.

Por ejemplo, una construcción con costo eficaz e intercalados superiores, usa contrahilos de madera balsa. Este material tiene una excelente adhesión, gran resistencia a la fatiga y a alto impacto con excelentes propiedades de ligereza, resistencia y rigidez. La madera balsa es el material "madre" del panal. La balsa ha probado su eficiencia en productos como cascos de botes, aviones, vehículos, tanques industriales resistentes a la corrosión. Es el núcleo más comúnmente usado debido a su bajo costo.

---

## 1.11 Adhesivos

---

Los adhesivos son usados para añadir compuestos a ellos mismos, así como a otras superficies. La unión de los adhesivos es un método de elección para compuestos pegados termofijos y en algunas ocasiones en compuestos termoplásticos. Existen muchas consideraciones para hacer efectiva la aplicación de los adhesivos. La unión o la interfase de conexión debe ser construida para elegir el mejor adhesivo y el mejor método de aplicación y así poder asegurar la resistencia de unión. La preparación cuidadosa de la superficie y el curado son críticos para el desarrollo de la unión.

Los adhesivos deberían ser usados en el diseño de las juntas donde la carga máxima es tomada por los componentes haciendo uso de las características de carga del adhesivo y del material compuesto. Los adhesivos más comunes son los acrílicos, epóxicos y los uretanos. Una unión de gran resistencia con una alta resistencia a la temperatura nos indica el uso de un epóxico, de otra manera con una resistencia media a la temperatura y buena resistencia y rápido curado, tal vez se deberá usar un acrílico. Para aplicaciones donde la dureza es necesaria, el uretano podría ser seleccionado. El servicio hacia el ambiente es una consideración importante en la selección del adhesivo para un mejor comportamiento mecánico.

## 1.12 Recubrimientos Gel

---

Los recubrimientos gel son considerados resinas pero tienen un propósito especial. El recubrimiento gel es una resina poliéster formulada especialmente con la incorporación de agentes trioxotrópicos para aumentar la viscosidad del recubrimiento gel, materiales de relleno y propiedades de fluencia, pigmentos para dar el color deseado y aditivos para propiedades específicas, tal como el tiempo de gelatinización y el curado. Los recubrimientos gel son principalmente usados para hacer contacto con el molde. El recubrimiento gel, usualmente pigmentado, nos da una superficie terminada en el molde que es resistente al ambiente y al desgaste. El recubrimiento gel también ayuda a esconder el patrón del refuerzo de vidrio que pudiera ser visto por la contracción de la resina inherente alrededor de las fibras de vidrio.

Actualmente el uso más común de los recubrimientos gel son en "aplicaciones en molde". Esto es, el recubrimiento gel es rociado en el molde y la lámina es aplicada atrás de este. La adhesión de la resina laminada con el recubrimiento gel es un tema crítico. El espesor del recubrimiento gel puede variar dependiendo del perfil deseado del compuesto. Por lo general, los recubrimientos gel son aplicados con spray. Mientras los recubrimientos gel no aportan ninguna resistencia estructural a los FRP, si son elásticos. Estos también son resistentes al agrietamiento térmico (agrietamiento que ocurre con cambios extremos de temperatura). Las principales mediciones de la elasticidad son el módulo de flexión y la elongación. Los recubrimientos gel son estabilizadores UV y son lo suficientemente pigmentados para dar una buena opacidad.

Los recubrimientos gel son usados para mejorar la filtración de la radiación UV, retarda la flama, da un aislamiento térmico, da resistencia química, mejora la resistencia a la abrasión y establece una barrera a la humedad. También son usados para dar una mejor apariencia del producto, como en el casco de un bote o en los palos de golf. Un beneficio único de los recubrimientos gel es que se encuentran en muchos colores por la incorporación de pigmentos por especificaciones del ingeniero.

## 1.13 Procesos de Manufactura

---

A continuación se mencionan algunos de los procesos de manufactura que son generalmente usados en el mercado para los productos de infraestructura civil y construcción. Algo que hace único a la industria de los compuestos es la habilidad de crear productos de diferentes maneras. Existe una gran variedad de procesos aplicables a la fabricación de compuestos que son eficientes y bajos en costo. Cada uno de los procesos de fabricación tienen características que definen el tipo de producto a fabricar. Esto es ventajoso ya que permite que el fabricante dé la mejor solución al cliente. En orden de seleccionar el proceso más eficiente, los equipos de producción deben de considerar varios factores como:

- Necesidades del usuario
- Volumen total de producción
- Requerimientos del producto
- Limitaciones y objetivos económicos
- Dimensiones del producto
- Cuestiones laborales
- Complejidad del terminado
- Materiales
- Apariencia
- Ensamble/ Herramientas
- Costo de producción
- Equipo

### *1.13.1 Pultrusión*

La pultrusión es un proceso de modelado continuo que combina las fibras de refuerzo y resina termofija. El proceso de pultrusión es usado en la fabricación de compuestos que tienen una sección transversal constante. Algunos ejemplos son las secciones de las barras o varillas, herramientas de mano, componentes de cables eléctricos, escalerillas de trenes y vigas de puentes así como secciones para ensamblar y fabricar plataformas de puentes. La mayoría de las láminas pultruidas son hechas usando hilo itinerante alineados bajo el eje del compuesto. Varios tapetes trenzados continuos, telas (tejidas, cosidas y trenzadas), y texturizados son usados para obtener una resistencia en el eje transversal.

El proceso es continuo y automatizado. Los materiales de refuerzo, como los hilos itinerantes, colchonetas o telas, son colocados en un lugar específico usando guías, y así crean la forma. Los refuerzos son pasados por un baño de resina donde el material es totalmente recubierto o impregnado con la resina líquida termofija. Los refuerzos saturados de resina entran a una caja de metal con calor llamada dado. Las dimensiones y la forma del dado definen las partes que están siendo fabricadas. Dentro del dado de metal, el calor es transferido, iniciado por un control de temperatura de los refuerzos y la resina líquida. La energía de calor activa el curado o polimerización de la resina termofija, cambiando de líquida a sólida. La lámina sólida emerge de la caja de pultrusión con la forma exacta de la cavidad del dado. La lámina se solidifica cuando es enfriada y es jalado continuamente por la máquina de pultrusión y es cortado a la longitud deseada. El proceso es conducido por un sistema de orugas localizado entre la salida de la caja y el mecanismo de corte.

La inversión inicial del capital es generalmente mayor a la de los procesos de molde abierto o el manual. El principal gasto para los productores de pultrusión son las guías para el manejo de materiales y los costos de fabricación de los dados. Finalmente resulta que el costo del proceso es menor para un alto volumen.

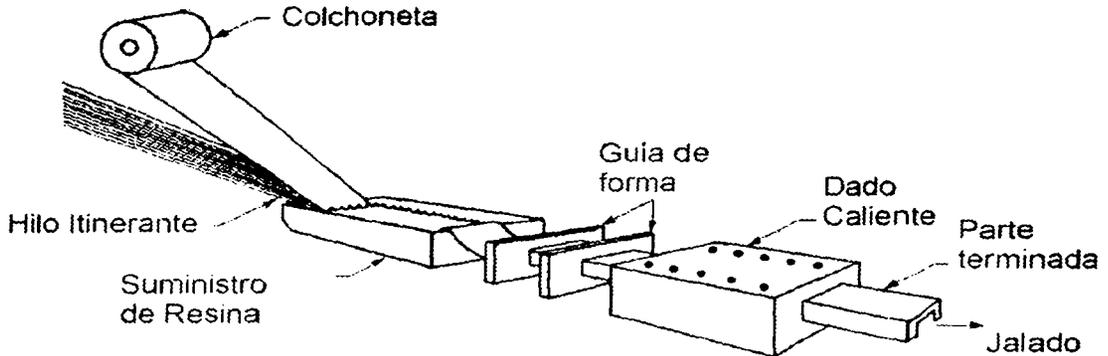


Figura 1.17 Proceso de Pultrusión

El proceso da una flexibilidad en el diseño de perfiles pultruidos. Actualmente, los perfiles arriba de 1.80 metros de ancho y 0.55 metros de alto son posibles. Partes simples o complejas pueden ser fabricadas haciendo uso de los procesos de pultrusión eliminando la necesidad de ensambles extensivos de los componentes después de la producción. Como el proceso es continuo, la variación de la longitud sólo está limitada por la capacidad de la transportación. Este proceso también permite la optimización de la arquitectura de la fibra con colores uniformes, eliminando la necesidad de pintar.

### 1.13.2 Moldeo por transferencia de resina (RTM)

El moldeo por transferencia de resina (RTM, Resin Transfer Molding) es comúnmente definido como un proceso de molde cerrado en el cual el material de refuerzo es colocado entre dos moldes – el macho y la hembra. El juego de moldes es cerrado y atornillado, y luego una resina termofija de baja viscosidad es inyectada a bajas presiones (345 kPa a 690 kPa) dentro de la cavidad del molde a través del puerto o serie de puertos en el molde. La resina es inyectada para llenar todos los huecos en el molde y penetrar y mojar toda la superficie de los materiales de refuerzo. El refuerzo puede incluir una variedad de tipos de fibras en varias formas, tales como fibras continuas, colchonetas o varios tipos de tejidos, así como híbridos de más de un tipo de fibra. En ocasiones se aplica vapor para alcanzar la fluidez de la resina y reducir la formación de bolsas de aire. El compuesto es típicamente curado por calor. En algunas ocasiones, la reacción exotérmica es suficiente para el curado.

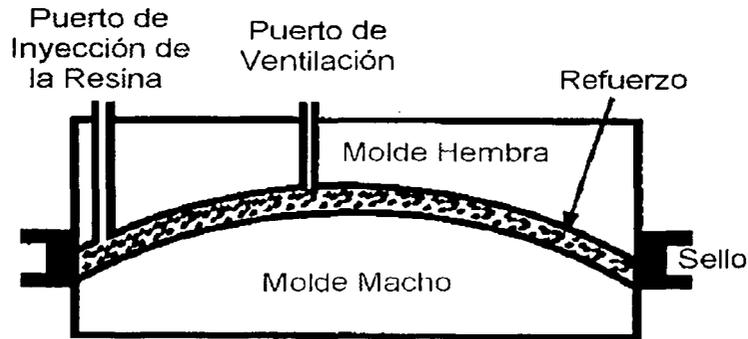


Figura 1.18 Moldes Usados en el RTM

El RTM, como proceso, es compatible con una variedad de resinas incluyendo el poliéster, viniléster, fenólico, acrílico modificado y resinas híbridas como el poliéster y el uretano. Por lo general, se requiere de una viscosidad de la resina de 200 a 600 centipoises para penetrar a todas partes de la cavidad del molde. Las ventajas del RTM son:

- Como un proceso de molde cerrado, las emisiones son menores que en procesos de molde abierto como el de spray o el manual.
- La superficie del molde puede producir un terminado de gran calidad (como en el acabado de automóviles clase A).
- Este proceso puede producir partes rápidamente - tanto como 5 a 20 veces más rápido que las técnicas de molde abierto.
- Produce tolerancias justas en dimensiones de  $\pm 0.130$  mm.
- Pueden ser desarrolladas formas de moldes muy complejas. Pueden ser incorporados dentro de los moldes cables y otros insertos.

Las desventajas de este proceso RTM son:

- Requiere de producciones de gran volumen para compensar los costos comparados con las técnicas de molde abierto.
- Las formas de refuerzo son limitadas debido a que el flujo de la resina satura las fibras.
- El tamaño de la parte es limitado por el molde.

Existe una variación de este proceso llamado Moldeo por Transferencia de Resina Asistido con Vapor, VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding), el cual es asistido con vapor, y sólo utiliza un molde.

### *1.13.3 Moldeo a Mano*

Este es un método de fabricación en el cual las capas de refuerzo son preimpregnadas o recubiertas de resina y colocadas en el molde a mano, después son curadas en la forma colocada.

Este método es el más antiguo y el más sencillo usado para producir láminas plásticas reforzadas o placas FRP. La inversión de capital es relativamente bajo. Por lo general, la parte más cara del equipo es la pistola de spray para la resina y los recubrimientos gel. Algunos fabricantes aplican la resina con brochas, por lo que la pistola no es requerida. Al parecer no hay limitaciones de dimensiones de una parte. Los moldes pueden hacerse de madera, láminas de metal, plásticos y compuestos FRP.

Particularmente en el proceso manual, la resina es rociada, vertida o aplicada con brocha en el molde. El refuerzo es después mojado en la resina y colocado en el molde. Dependiendo del espesor o la densidad del refuerzo, se puede poner resina adicional para humedecer la superficie del molde. Después el refuerzo es enrollado, brochado o aplicado usando un rodillo para remover el aire atrapado y compactarlo contra la superficie del molde. Las colchonetas de trenzas cortadas es la forma de refuerzo de menor costo. Esto también da una resistencia igual en todas las direcciones debido a la orientación aleatoria de las fibras en la colchoneta. Los hilos itinerantes tejidos son especialmente buenos para láminas o placas delgadas que requieren gran resistencia. Las telas tejidas y trenzadas pueden también un bajo costo de refuerzo. Una vez que el refuerzo es totalmente mojado con la resina, puede ser fácilmente moldeado a formas complejas.

### *1.13.4 Moldeo por compresión*

El moldeo por compresión es el método más común para moldear materiales termofijos tal como el Moldeo por Compresión SMC (sheet molding compound) y el BMC (bulk molding compound). Esta técnica de moldeo involucra materiales de compresión que contienen un catalizador activado por temperatura a calor, juego de cajas de metal usadas con una prensa vertical.

El proceso de moldeo comienza con la colocación del material compuesto con una alta viscosidad sin curar al molde. Por lo general, las temperaturas del molde oscilan entre 175° y 200° C. Como el molde cierra, el compuesto viscoso es modificado por el calor y presurizado a aproximadamente 6.9 MPa. La resina y el refuerzo fluyen para llenar las cavidades del molde.

Mientras el molde se mantiene cerrado, el material termofijo atraviesa por un cambio químico (curado) que se endurece permanentemente en la forma del molde. El tiempo que el molde se mantiene cerrado va de los 30 segundos a varios minutos dependiendo de la parte diseñada.

Cuando el molde se abre, las partes están listas para las operaciones de acabado como antirreflejantes, pintura, brillo o aplicación de aceleradores.

### 1.13.5 Moldeo por rotación de filamentos

El proceso de moldeo por rotación de filamentos es usado en la fabricación de compuestos axisimétricos o tubulares. Por lo general, son tubos, conductos eléctricos o tanques. Los hilos itinerantes trenzados que pueden ser de vidrio, carbono o aramida son impregnados con una resina líquida termofija y colocados en un rodillo o carrete. Cuando el enrollamiento ha terminado, la resina es curada y el compuesto puede ser removido del rodillo o carrete.

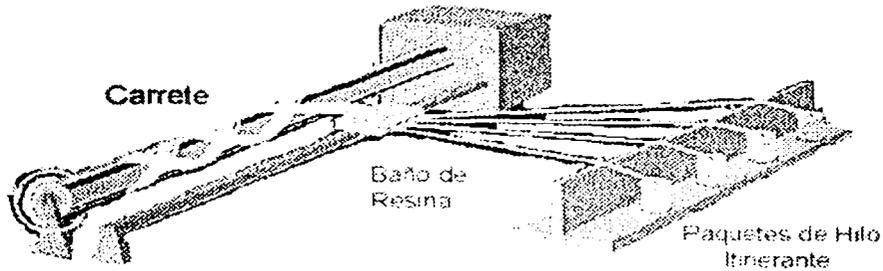


Figura 1.19 Diagrama del moldeo por rotación filamentos

El capital de inversión es alto comparado con los procesos de moldeo abierto. El principal gasto para enrollar un filamento es el costo del rodillo para aplicaciones particulares.

## PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS FRP

### 2.1 Propiedades de los materiales constituyentes

---

Para poder hablar de las propiedades de las barras, tendones, placas, láminas FRP, los siguientes puntos deben de tenerse en cuenta. Primero, una barra es anisotrópica, con su eje longitudinal como eje principal. Segundo, a diferencia del acero, las propiedades mecánicas de los compuestos FRP varían significativamente de un producto a otro. Algunos factores, tales como el volumen y tipo de fibra y resina, orientación de la fibra, efectos dimensionales y control de calidad durante la fabricación, representan un papel importante en el establecimiento de las características del producto. Además, las propiedades mecánicas de los compuestos FRP, como todos los materiales estructurales, son afectados por factores como historia y duración de la carga, temperatura y humedad.

#### *2.1.1 Fibras de Refuerzo*

Las propiedades de las fibras de refuerzo dependen enormemente de la dirección en que se midan con relación a la dirección de las fibras. La resistencia a tensión y el módulo de una lámina unidireccional es máxima cuando estas propiedades se miden en la dirección longitudinal de la fibra. En otros ángulos, las propiedades se reducen.

Los metales fluyen y se deforman plásticamente bajo carga. La mayoría de las fibras de refuerzo son elásticas dentro de sus características de esfuerzo – deformación. La naturaleza heterogénea de las fibras nos lleva a tener mecanismos de gran energía de absorción comparados en una microescala con los procesos de fluencia de los metales.

Muchas fibras de refuerzo tienen propiedades internas de humedecimiento, esto nos lleva a tener mejor energía de absorción con el material y reduce la vibración a estructuras adyacentes. Este aspecto sobre el comportamiento del compuesto puede ser relevante para las estructuras de ingeniería civil (puentes, carreteras, etc.) que están sujetas a cargas que son más transitorias y de menor duración que las cargas excesivas sostenidas.

### 2.1.1.1 Fibra de vidrio

El vidrio es la fibra predominante para muchas aplicaciones en la construcción debido a su equilibrio económico y sus propiedades de resistencia específicas. Las fibras de vidrio se encuentran en varias formulaciones como el vidrio "E" (por su grado "E"léctrico), el vidrio "S-2" que es el de mayor uso debido a su alta resistencia y el vidrio "ECR" que es un vidrio modificado para tener resistencia a los ácidos. Entre otras composiciones de vidrio podemos mencionar el AR, R y Te. Algunas propiedades comunes del vidrio se muestran en la Tabla 2.1, se incluyen también algunas propiedades de las otras fibras de refuerzo para poder ir comparando su efectividad.

Tabla 2.1 Propiedades de las fibras en forma natural

|              | Densidad | Resistencia a tensión | Módulo a tensión |
|--------------|----------|-----------------------|------------------|
|              |          | MPa                   | GPa              |
| Vidrio E     | 2.58     | 2689                  | 72.4             |
| Vidrio S-2   | 2.48     | 4280                  | 86.0             |
| Vidrio ECR   | 2.62     | 3625                  | 72.5             |
| Aramida K-49 | 1.44     | 3620                  | 131.0            |
| Carbono AS4  | 1.80     | 3790                  | 234.0            |

\*Propiedades mecánicas de un solo filamento  
Fuente: Owens Corning Corp. 1993

### 2.1.1.2 Fibra de carbono

Existen tres fuentes para la comercialización de las fibras de carbono: brea, producto de la destilación del petróleo; PAN (poliacrilonitrilo) y el rayón. Las propiedades de las fibras de carbono son controladas por su estructura molecular. Existen dos tipos de fibra de carbono, el Tipo I de alto módulo y el Tipo II de alta resistencia. La diferencia de las propiedades entre los dos tipos es resultado de la diferencia en la microestructura de la fibra. Estas propiedades resultan de un arreglo de redes de capas de grafeno (hexagonal) presentes en el grafito.

Las fibras de carbono se venden en hilos jalados o manojos de filamentos paralelos. El rango de filamentos individuales en un hilo jalado es normalmente de 1000 a 200, 000 fibras. También se pueden encontrar como prepreg, en formas de hojas unidireccionales. Las propiedades típicas

de las fibras de carbono comerciales se muestran en la Tabla 2.2. Nuevamente se incluyen otras fibras para la comparación.

Tabla 2.2 Propiedades típicas de las fibras de refuerzo comerciales

| Fibra                                 | Diámetro (micrones) | Densidad g/cm <sup>3</sup> | Módulo a tensión GPa | Resistencia a tensión GPa | Deformación a la falla (%) | Coefficiente de expansión térmica 10 <sup>-6</sup> /°C | Relación de Poisson |
|---------------------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------|
| VIDRIO                                |                     |                            |                      |                           |                            |                                                        |                     |
| Vidrio - E                            | 10                  | 2.54                       | 72.4                 | 3.45                      | 4.8                        | 5                                                      | 0.2                 |
| Vidrio - S                            | 10                  | 2.49                       | 86.9                 | 4.30                      | 5.0                        | 2.9                                                    | 0.22                |
| CARBONO                               |                     |                            |                      |                           |                            |                                                        |                     |
| Carbono - PAN<br>T - 300 <sup>1</sup> | 7                   | 1.76                       | 231                  | 3.65                      | 1.4                        | -0.1 a -0.5<br>(longitudinal), 7 - 12<br>(radial)      | 0.2                 |
| AS <sup>2</sup>                       | 7                   | 1.77                       | 220                  | 3.10                      | 1.2                        | -0.5 a -1.2<br>(longitudinal), 7 - 12<br>(radial)      | -                   |
| t - 40 <sup>3</sup>                   | 6                   | 1.81                       | 276                  | 5.65                      | 2.0                        | -                                                      | -                   |
| HSB <sup>4</sup>                      | 7                   | 1.85                       | 344.5                | 2.34                      | 0.6                        | -                                                      | -                   |
| Fortafil 3                            | 7                   | 1.80                       | 227                  | 3.80                      | 1.7                        | -0.1                                                   | -                   |
| Fortafil 5                            | 7                   | 1.80                       | 345                  | 2.76                      | 0.8                        | -                                                      | -                   |
| CARBONO - BREA                        |                     |                            |                      |                           |                            |                                                        |                     |
| P - 555 <sup>5</sup>                  | 10                  | 2.00                       | 380                  | 1.90                      | 0.5                        | 0.9 (longitudinal)                                     | -                   |
| P - 100 <sup>6</sup>                  | 10                  | 2.15                       | 58                   | 2.41                      | 0.3                        | 1.6 (longitudinal)                                     | -                   |
| ARAMIDA                               |                     |                            |                      |                           |                            |                                                        |                     |
| Kevlar 49 <sup>7</sup>                | 11.9                | 1.45                       | 131                  | 3.62                      | 2.8                        | -2.0 (longitudinal),<br>+59 (radial)                   | 0.35                |
| Twaron<br>1055 <sup>8</sup>           | 12.0                | 1.45                       | 127                  | 3.60                      | 2.5                        | -2.0 (longitudinal),<br>+59 (radial)                   | 0.35                |

<sup>1</sup>Amoco, <sup>2</sup>Hercules, <sup>3</sup>Akzo - Nobel/Fortafil, <sup>4</sup>DuPont, <sup>5</sup>Akzo - Nobel Fibers

Fuente: Akzo - Nobel, 1994

### 2.1.1.3 Fibra de aramida

Existen muchas fibras orgánicas que pueden ser usadas en aplicaciones de infraestructura civil. Su costo y en algunas ocasiones su temperatura de servicio o factores de durabilidad restringen su uso. La fibra orgánica más popular es la aramida. La fibra es poliparafenileno-teraftálamida conocida como PPD - T. Las fibras de aramida son producidas comercialmente por DuPont (Kevlar<sup>TM</sup>) y Akzo - Nobel (Twaron<sup>TM</sup>).

El Kevlar<sup>TM</sup> 49 y el Twaron<sup>TM</sup> 1055 son las marcas más usadas hoy en día debido a su alto módulo. El Kevlar<sup>TM</sup> 49 y el Twaron<sup>TM</sup> 1055 son usados en aplicaciones balísticas que requieren demasiada rigidez. Las fibras de aramida están disponibles en hilos, hilos itinerantes, hilos jalados y varias

<sup>TM</sup> Se refiere a una marca registrada internacionalmente. A lo largo del trabajo se referirá con este símbolo a todas las marcas registradas internacionalmente.

presentaciones más. Las propiedades detalladas de las fibras de aramida se encuentran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Propiedades del hilo y fibra de refuerzo de ARAMIDA

| Propiedad                   | Fovlar™ 49 | Iwaron™ 1055 |
|-----------------------------|------------|--------------|
| <b>Hilo</b>                 |            |              |
| Resistencia a tensión, MPa  | 2896       | 2774         |
| Tenacidad dl/lb-in          | 29.4       | 19.0         |
| Módulo, GPa                 | 117.2      | 103.4        |
| Elongación a la falla, %    | 2.5        | 2.5          |
| Densidad, g/cm <sup>3</sup> | 1.44       | 1.45         |
| <b>Fibras de Refuerzo</b>   |            |              |
| Resistencia a tensión, MPa  | 3620       | 3599         |
| Módulo, GPa                 | 134.1      | 127.0        |
| Elongación a la falla, %    | 2.9        | 2.5          |
| Densidad, g/cm <sup>3</sup> | 1.44       | 1.45         |

Fuente: DuPont y Akzo – Nobel, 1994

#### 2.1.1.4 Híbridos

Las fibras de polietileno de alto peso molecular es fabricada y comercializada por Allied Signal Corp en Estados Unidos y es llamada Spectra™. La Tabla 2.4 muestra las propiedades de la fibra de polietileno. La mayor aplicación de Spectra ha sido en cables e aplicaciones balísticas. Su ligereza combinada con su resistencia y su baja elongación la hacen atractiva para su uso.

Tabla 2.4 Propiedades de las fibras Spectra

|                               | Spectra™ 9000 | Spectra™ 1000 |
|-------------------------------|---------------|---------------|
| Densidad, g/cm <sup>3</sup>   | 0.97          | 0.97          |
| Diámetro del filamento, m     | 88            | 27            |
| Módulo a tensión, GPa         | 117           | 172           |
| Resistencia a tensión, GPa    | 2.6           | 2.9-3.3       |
| Elongación a la falla, %      | 3.5           | 2.7           |
| Número de filamentos por hilo | 60-120        | 60-120        |

Fuente: Engineering Materials Handbook, Figliacampi, J. 1987

Los refuerzo híbridos pueden ser combinados en la estructura y con un arreglo uniaxial para dar propiedades adecuadas a costos aceptables. Las aplicaciones en infraestructura son oportunidades naturales para la evaluación y la utilización de las combinaciones. La Tabla 2.5 muestra el resultado de lo que se puede obtener.

Tabla 2.5 Propiedades de compuestos híbridos de carbono – vidrio – poliéster\*

| Relación Carbono/ Vidrio | Resistencia a tensión, MPa | Módulo de elasticidad a tensión, GPa | Resistencia a flexión, MPa | Módulo a flexión, GPa | Resistencia al cortante, MPa | Densidad, g/cm |
|--------------------------|----------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------|----------------|
| 0:100                    | 604.7                      | 40.1                                 | 944.6                      | 35.4                  | 65.5                         | 1.91           |
| 25:75                    | 641.2                      | 63.9                                 | 1061.8                     | 63.4                  | 74.5                         | 1.85           |
| 50:50                    | 689.5                      | 89.6                                 | 1220.4                     | 78.6                  | 75.8                         | 1.80           |
| 75:25                    | 806.7                      | 123.4                                | 1261.7                     | 1261.7                | 82.7                         | 1.68           |

\* El contenido de fibra es por volumen. La resina (poliéster bismolijo) representa 48% más un 52% de las fibras continuas orientadas unidireccionalmente, esto equivale a 30% de resina y 70% de fibra por peso. Estas propiedades aplican sólo en la dirección de la fibra

Fuente: Composite Materials Handbook, Schwarz, M., 1992

### 2.1.2 Resinas

Un polímero es definido como una gran cadena molecular que tiene uno o más unidades repetidas de átomos unidos por un covalente fuerte. Un material polimérico (por ejemplo, un plástico) es una colección de un gran número de moléculas poliméricas de una estructura química similar. Si en la fase sólida, las moléculas son ordenadas en forma aleatoria, se dice que el plástico es amorfo. Si las moléculas están en combinaciones aleatorias y ordenadas en ciertos arreglos, se dice que el polímero es semicristalino.

Como se menciona en el Capítulo 1 existen varios tipos de resinas termoplásticas y termofijas, además, las fibras de refuerzo pueden ser impregnadas por éstas por muchos procesos. Los polímeros termofijos, son colocados en bajas viscosidades, en estado líquido. Por otra parte, los polímeros termoplásticos, tienen una alta resistencia al impacto así como una alta resistencia a la fractura.

La Tabla 2.6 muestra las propiedades físicas y mecánicas de resinas poliéster y viniléster en forma natural (sin reforzar). Se presentan estas resinas que son las más usadas junto con la resina epóxica, su comportamiento físico es representado en la Figura 2.1.

Tabla 2.6 Propiedades físicas de resinas netas

|                               | Isopoliéster<br>241 | Viniléster<br>950-35 | Viniléster<br>D-1618 | Viniléster<br>D-1222 |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Resistencia a tensión, MPa    | 78.6                | 47.6                 | 89.6                 | 79.3                 |
| Dureza Barcol                 | 50                  | 45                   | 45                   | 40                   |
| Módulo a tensión, MPa         | 3309                | 3569                 | 3171                 | 3241                 |
| Elongación a la falla, %      | 2.9                 | 4.2                  | 5.2                  | 3.9                  |
| Resistencia a flexión, MPa    | 125.5               | 149.6                | 149.6                | 113.7                |
| Módulo a flexión, MPa         | 3447                | 3379                 | 3379                 | 3654                 |
| Temperatura de distorsión, °C | 109                 | 133                  | 119                  | 141                  |

Fuente: Ashland Chemical, Inc. 1993

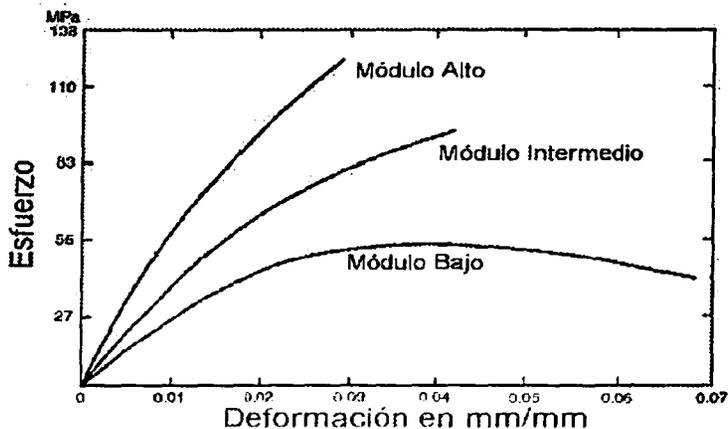


Figura 2.1 Diagrama Esfuerzo – Deformación de tres materiales epoxicos  
Fuente: Composite Materials Handbook, Schwarz, M., 1992

## 2.2 Barras y Tendones FRP

### 2.2.1 Propiedades Físicas

#### 2.2.1.1 Densidad

Las barras y tendones FRP tienen una densidad en el rango de 1.25 a 2.1 g/cm<sup>3</sup>, lo que significa que aproximadamente son entre cuatro y seis veces más ligeras que el acero (Tabla 2.7). El reducido peso lleva a una menor carga de transportación y costos de almacenamiento, disminución de la mano de obra y menores tiempos de instalación en el lugar de trabajo en comparación con las barras de acero. Esta es una ventaja que puede ser incluida en cualquier análisis de costos para la selección de productos.

Tabla 2.7 Densidad típica de las barras de refuerzo en g/cm<sup>3</sup>

| Acero | FRPV        | FRPC        | FRPA        |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| 7.9   | 1.25 a 2.10 | 1.50 a 1.60 | 1.25 a 1.40 |

Fuente: ACI 440.1R-01, 2001 "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars"

### 2.2.1.2 Expansión Térmica

El concreto reforzado por sí mismo es un material compuesto, donde el refuerzo actúa como el medio de reforzamiento y el concreto como la matriz. Por lo tanto es imperativo que el comportamiento bajo esfuerzos térmicos para los dos materiales sean similares, de tal manera que las deformaciones diferenciales entre el acero y el concreto sean mínimas. Dependiendo de las proporciones de la mezcla, el coeficiente de expansión térmica lineal para el concreto varía desde 6 a  $11 \times 10^{-6}$  por  $^{\circ}\text{C}$  y se suele asumir que es isotrópico.

Los coeficientes de expansión térmica de las barras FRP pueden variar en las direcciones transversal y longitudinal dependiendo del tipo de fibra, resina y el volumen de la fibra. El coeficiente de expansión térmica longitudinal se da por las propiedades de las fibras mientras que el transversal es proporcionado por la resina. La tabla 2.8 enlista los coeficientes de expansión térmica típicos para barras FRP y acero. Es importante notar que los valores negativos significan que el material se contrae con el incremento de la temperatura y se expande con el decremento de ésta.

Tabla 2.8 Coeficientes de expansión térmica típicos para barras de refuerzo\*

| Dirección                   | C.T.E. $\times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ |             |              |             |
|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------|--------------|-------------|
|                             | Acero                                      | FRPV        | FRPC         | FRPA        |
| Longitudinal, $\mu\text{I}$ | 11.7                                       | 6.0 a 10.0  | -9.0 a 0.0   | -6 a -2     |
| Transversal, $\mu\text{I}$  | 11.7                                       | 21.0 a 23.0 | 74.0 a 104.0 | 60.0 a 80.0 |

\* Valores típicos para volumen de fibra del 50% al 70%

Fuente: ACI 440.1R-01, 2001 "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars"

## 2.2.2 Propiedades Mecánicas

### 2.2.2.1 Resistencia a Tensión

Las barras y tendones FRP alcanzan su resistencia última a tensión sin exhibir ninguna fluencia. A diferencia del acero, la resistencia a tensión de las barras de FRP es una función del diámetro de la barra. Debido al esfuerzo cortante, las fibras que están cerca del centro de la barra en la sección transversal no están sometidas a mucho esfuerzo como aquellas fibras que encuentran en la parte exterior de la barra<sup>1</sup>. Este fenómeno resulta en resistencias reducidas y eficiencia en diámetros de barras largas. Por ejemplo, para el refuerzo FRPV la resistencia a tensión es de 480 MPa para barras de 28.7 mm (#9) y 890 MPa para barras de 9.5 mm (#3)<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Faza, S., "Behavior of Concrete Members Reinforced with Fiber Reinforced Plastics Rebars", Tesis de Doctorado, Universidad de Virginia Oeste, 1991

<sup>2</sup> Ehsani, M.R. et al., *Bond of GFRP Rebars to Ordinary Strength Concrete*, Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures SP-138, ACI 1993

Como se menciona en el párrafo anterior, cuando se carga a tensión una barra FRP no exhibe ningún comportamiento plástico antes de la ruptura. El comportamiento a tensión de una barra FRP consiste en un tipo de fibra que es caracterizada por su relación esfuerzo – deformación y que es elástico lineal hasta la falla. Las propiedades a tensión de las barras FRP usadas más comúnmente se resumen en la Tabla 2.9.

La resistencia al esfuerzo a tensión y la rigidez de una barra FRP dependen de varios factores. Debido a que las fibras en una barra FRP son el material constituyente que soporta la mayor carga, la relación del volumen de la fibra y el volumen total del FRP (fibra – fracción de volumen) afectan significativamente las propiedades a tensión de las barras FRP. En otras palabras, el volumen de fibra es el contenido de fibra en porcentaje, por ejemplo, es común manejar fibra en un 50% y 70% (0.5 a 0.7) y la resina constituye el porcentaje restante, es decir, del 30% al 50% (0.3 a 0.5), todo en porcentajes del compuesto total.

Tabla 2.9 Propiedades a tensión usuales de las barras de refuerzo\*

|                                   | Acero      | FFPV        | FFPC          | FRPA         |
|-----------------------------------|------------|-------------|---------------|--------------|
| Esfuerzo de fluencia nominal, MPa | 276 a 517  | N/D         | N/D           | N/D          |
| Esfuerzo a tensión, MPa           | 483 a 690  | 483 a 1600  | 600 a 3690    | 1720 a 2540  |
| Módulo de elasticidad, GPa        | 200        | 35.0 a 51.0 | 120.0 a 580.0 | 41.0 a 125.0 |
| Deformación de fluencia, %        | 1.4 a 2.5  | N/D         | N/D           | N/D          |
| Deformación de falla, %           | 6.0 a 12.0 | 1.2 a 3.1   | 0.5 a 1.7     | 1.9 a 4.4    |

\* Valores típicos para volumen de fibra del 50% al 70%  
N/D = No Disponible

Fuente: ACI 440.1R-01, 2001 "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars"

La relación que hay entre el esfuerzo y la deformación, en una barra normal, constituida por un tipo de material fibroso (sea vidrio, carbono o aramida) puede ser representada por una línea que se comporta de manera casi rectilínea hasta el punto de máximo esfuerzo (ver figura 2.2).

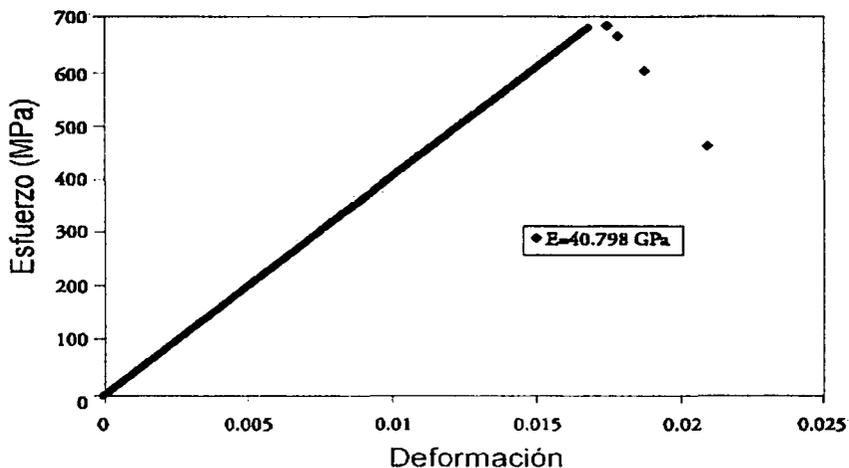


Figura 2.2 Curva Típica Esfuerzo/ Deformación de las barras FRPV

Fuente: Ficha Técnica Aslan™ 100 GFRP Rebar de Hughes Brothers

A diferencia de las barras de acero, algunas barras FRP muestran efectos substanciales en el área transversal debido a la tensión. Por ejemplo, tres fabricantes de barras FRPV muestran reducciones de la resistencia a tensión por más del 40% conforme el diámetro aumenta proporcionalmente de 9.5 a 22.2 mm. Este efecto se muestra en la Tabla 2.10. Por otro lado, existen cambios en la sección transversal que no pareciera afectar la resistencia de cables FRPC trenzados. La sensibilidad de las barras FRPA en su sección transversal varía de un producto comercial a otro.

Tabla 2.10 Esfuerzo a tensión, diámetro nominal y área transversal de una barra FRPV

| Diámetro de la barra |     | Área sección transversal* | Diámetro Nominal | Esfuerzo a Tensión | Módulo de Elasticidad a Tensión |
|----------------------|-----|---------------------------|------------------|--------------------|---------------------------------|
| (mm)                 | (#) |                           |                  |                    |                                 |
| 6                    | #2  | 31.67                     | 6.35             | 830                | 40.8                            |
| 9                    | #3  | 71.26                     | 9.53             | 760                | 40.8                            |
| 12                   | #4  | 126.68                    | 12.7             | 690                | 40.8                            |
| 16                   | #5  | 197.93                    | 15.88            | 655                | 40.8                            |
| 19                   | #6  | 285.02                    | 19.05            | 620                | 40.8                            |
| 22                   | #7  | 387.95                    | 22.23            | 586                | 40.8                            |
| 25                   | #8  | 506.71                    | 25.4             | 550                | 40.8                            |
| 32                   | #10 | 791.73                    | 31.75            | 480                | 40.8                            |

Fuente: Ficha Técnica Aslan™ 100 GFRP Rebar de Fortius

Algunos tendones fueron hechos entrelazando siete barras pultruidas de FRPV o FRPC de diámetros de van desde los 3 a los 4 mm. La resistencia última de estos tendones fue comparable con los torones de acero pretensado. Para tendones de FRPV, la resistencia última varía de 1380 a 1724 MPa, mientras que los tendones de FRPC van de 1862 a 2070 MPa<sup>3</sup>.

### 2.2.2.2 Módulo de Elasticidad a Tensión

El módulo de elasticidad de las barras FRPV es aproximadamente el 25% que el del acero. El módulo para los tendones FRPC, los cuales usan comúnmente fibras rígidas, es mayor que el de las barras de refuerzo FRPV.

### 2.2.2.3 Resistencia a la compresión

Las barras de FRP son más débiles en compresión que en tensión. Esto es resultado de las dificultades en pruebas precisas unidireccionales a compresión. De cualquier forma, la resistencia a compresión de los compuestos FRP no es lo importante para mayores aplicaciones. La resistencia a compresión también depende de si la barra de refuerzo es lisa o corrugada. La resistencia a compresión de barras FRPV se encuentra en el rango de 317 a 470 MPa para barras de 552 a 896 MPa de resistencia a tensión<sup>4</sup>.

Pruebas hechas a barras FRP con una relación longitud – diámetro de 1:1 a 2:1 han mostrado que la resistencia a compresión es menor que a tensión<sup>4</sup>. El modo de falla de las barras FRP sujetas a compresión longitudinal puede ser falla transversal a tensión, micropandeo de la fibra o falla por cortante. El modo de falla depende del tipo de fibra, el volumen de la fibra y el tipo de resina. Se han reportado resistencias a compresión de 55, 78 y 20% de la resistencia a tensión para FRPV, FRPC y FRPA, respectivamente<sup>4</sup>. En general, la resistencia a compresión es mayor en barras con mayor resistencia a tensión, excepto en el caso del FRPA, donde las fibras tienen un comportamiento no lineal a compresión a esfuerzos bajos.

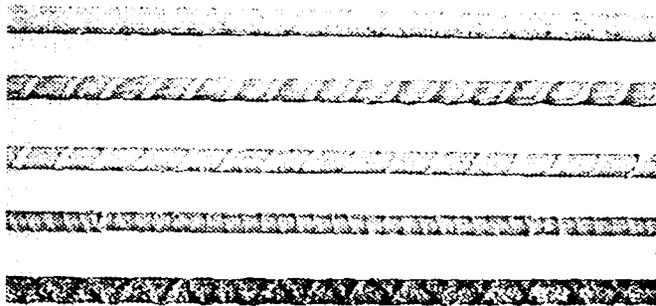


Figura 2.3 Barras de refuerzo FRPV

<sup>3</sup> Iyer, S.L. y Anigol, M., "Testing and Evaluating Fiber Glass, Graphite and Steel Cables for Pretensioned Beams", *Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures*, ASCE, febrero, 1991

<sup>4</sup> Wu, W.P., "Thermomechanical Properties of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bars", Tesis de Doctorado, Universidad de Virginia Oeste, 1990

#### 2.2.2.4 Módulo de Elasticidad a Compresión

A diferencia de la rigidez a tensión, la rigidez a compresión varía con el tamaño, tipo, control de calidad en la fabricación y relación longitud – diámetro de las barras de refuerzo FRP. La rigidez a compresión de las barras de refuerzo FRP es menor que el módulo de elasticidad a tensión. Basándose en pruebas a probetas que contenían del 55 al 60% de volumen de fibras continuas de vidrio "E" en una matriz de viniléster o resina isoftálica, se obtuvo un módulo de 34 a 48 GPa<sup>4</sup>.

De acuerdo con los informes, el módulo de elasticidad a compresión es aproximadamente 80% para FRPV, 85% para FRPC y 100% para FRPA de su módulo de elasticidad a tensión del mismo producto <sup>5</sup>.

#### 2.2.2.5 Resistencia al Cortante

En general la resistencia al cortante de los compuestos es muy baja. Las barras FRP, por ejemplo, pueden ser cortadas muy fácilmente en la dirección perpendicular al eje longitudinal con sierras ordinarias como sequetas.

#### 2.2.2.6 Fluencia y Ruptura a la Fluencia

Las fibras de carbono y vidrio tienen una excelente resistencia a la fluencia, a diferencia de la mayoría de las resinas. Además, la orientación y el volumen de las fibras tienen una influencia significativa en el desarrollo de la fluencia de las barras y tendones de refuerzo. Un estudio reporta que para una barra FRPV de alta calidad, la deformación adicional causada por la fluencia es estimada en tan sólo 3 % de la deformación elástica inicial <sup>6</sup>.

Las barras y tendones FRP sujetas a una carga constante y a condiciones ambientales adversas a través del tiempo pueden fallar repentinamente después de un periodo de tiempo llamado tiempo de aguante. Este fenómeno es conocido como ruptura a la fluencia (o fatiga estática), existe para todos los materiales estructurales incluyendo al acero. El acero puede aguantar las cargas típicas a tensión, a niveles alrededor del 75% de la resistencia última, indefinidamente sin pérdida de resistencia o fractura.

#### 2.2.2.7 Fatiga

Las barras FRP tienen una buena resistencia a la fatiga. La mayor investigación respecto a la fatiga ha sido en fibras de alto módulo (aramida y carbono), las cuales estuvieron sujetas a largos ciclos de cargas tensión – tensión en la industria aeroespacial. En pruebas donde la carga fue repetida 10 millones de ciclos, se concluyó que los compuestos de carbono – epóxicos tienen mejor resistencia a la fatiga que el acero, mientras que la resistencia a la fatiga de los compuestos de vidrio es menos que la del acero a una menor relación de esfuerzos<sup>7</sup>.

<sup>4</sup> Mallick, P.K., " *Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design*", New York, 1988

<sup>5</sup> Iyer, S.L. y Anigol, M., " *Testing and Evaluating Fiber Glass, Graphite and Steel Cables for Pretensioned Beams*", Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, ASCE, febrero, 1991

<sup>6</sup> Schwarz, M.M., " *Composite Materials Handbook*", McGraw Hill, 1992

Otras investigaciones han mostrado buena resistencia a la fatiga en las barras de conexión de FRPV en esfuerzo a cortante sujetos a 10 millones de ciclos <sup>10</sup>. En otra investigación, las barras FRPV construidas para presforzado fueron sometidas a repetidos ciclos de carga con un máximo esfuerzo a cortante de 496 MPa y un esfuerzo normal de 345 MPa. Las barras pudieron soportar más de 4 millones de ciclos de carga antes de la falla iniciada en la zona de anclaje <sup>9</sup>.

Los tendones FRPC tienen una buena resistencia a la fatiga, los cuales a través de pruebas resistieron 2 millones de ciclos de tensión – tensión. El esfuerzo resultante fue del 60% del esfuerzo último con niveles de esfuerzo mínimos y máximos de 55 y 64 por ciento del esfuerzo último. El módulo de elasticidad de los tendones no cambia después de las pruebas de fatiga <sup>10</sup>.

### 2.2.2.8 Capacidad de Adhesión

La capacidad de adhesión de las barras de FRP con respecto al concreto se basa en ensayos de extracción (*pull-out test*) efectuados siguiendo el método de la Universidad Estatal de Pennsylvania (*Penn State method*) descrito a continuación.

Este método es utilizado porque permite una fácil repetición de las pruebas y provee también un valor indicativo de las prestaciones relativas. Los moldes en madera contrachapada se utilizan para fabricar un bloque de concreto, en el cual se introducen las barras de aproximadamente un metro de longitud (Figura 2.3).

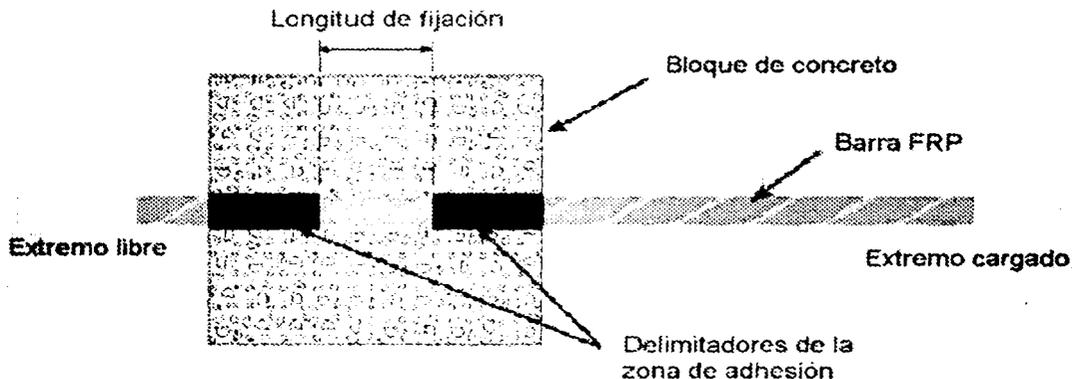


Figura 2.4 Método de Penn State

Fuente: Ficha Técnica Aslan™ 100 GFRP Rebar de Hughes Brothers

<sup>9</sup> Porter, M.L. et al, "Thermoset Composite Concrete Reinforcement", Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Estatal de Iowa, octubre, 1992

<sup>10</sup> Franke, L., "Behavior and Design of High Quality Glass Fiber Composite Rods as Reinforcement for Prestressed Concrete Members", Symposium Internacional CP/Ricem, Praga, 1981

<sup>11</sup> Gortly, S.S., "Mechanical Properties of Composite Cables", Tesis de Maestría, Escuela Tecnológica de Minas de Dakota del Sur, 1994

Para delimitar la zona de adhesión y evitar que la barra y el concreto se pongan en contacto entre sí, se utilizan trozos de tubo de plástico blando, que se colocan alrededor de la barra. La longitud de la zona de fijación tiene un largo de cinco veces el diámetro de la barra.

Las muestras de concreto empleadas presentan una resistencia normal a la compresión en cilindros a 14 días aproximadamente 45 MPa.

Las solicitaciones se miden mediante una celda de carga (dinamómetro) electrónica, montada sobre un armazón de prueba; el deslizamiento entre la barra y el concreto es evaluado mediante seis transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) a corriente continua, de los cuales tres están colocados en un extremo y tres en el otro. Mientras los LVDT montados en el extremo libre proveen mediciones directas del correspondiente deslizamiento, los valores relativos del extremo cargado tienen que ser adaptados en función al alargamiento que sufre la porción de barra comprendida entre el extremo cargado de la parte fijada y el punto en el cual se introduce el transformador diferencial. Cuando se sumerge en el concreto una armadura de barras de FRPV, la adhesión puede ser "transferida" por medio de los siguientes mecanismos internos: resistencia a la adhesión del acoplamiento, resistencia debida a la fricción del acoplamiento como consecuencia del deslizamiento, efecto cuña por fricción, debido a la irregularidad del acoplamiento. Además, la adhesión se transfiere a las fibras de FRP también a través de la matriz. De cualquier manera, también es posible que se verifique una falta de fricción debido a una escasa adhesión. La fricción y el bloqueo recíproco se consideran los medios principales de transferencia de los esfuerzos.

La figura 2.4 nos muestra los resultados de las pruebas Penn State para obtener la capacidad típica de adhesión de las barras FRP.

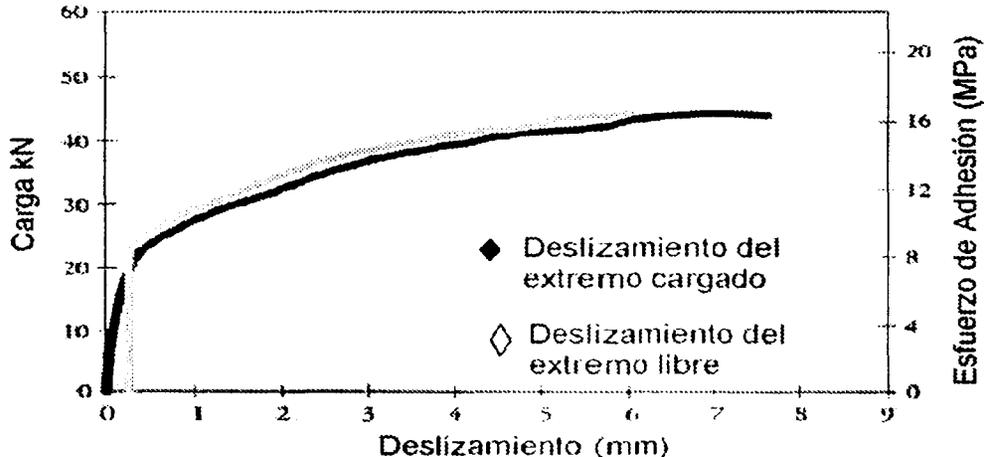


Figura 2.5 Curva típica Carga /Deslizamiento de las barras FRPV  
Fuente: Ficha Técnica Aslan™ 100 GFRP Resbar de Hughes Brothers

### 2.2.2.9 Dobleces, Estribos y Formas.

Las barras para armaduras de FRPV se fabrican con resinas termofijas. Por este motivo no pueden ser dobladas posteriormente en obra, ya que una vez que el material ha sido curado, no se podrá realizarse ningún plegado. Los elementos curvos y estribos, en consecuencia, tienen que ser realizados en fábrica. Si se comparan con la parte recta de la barra, los estribos y los elementos curvos presentan una reducción de la resistencia a la tensión (igual al 60%)<sup>11</sup>. Se ha confirmado experimentalmente que el porcentaje de reducción depende del radio de curvatura de la parte plegada y del diámetro de la barra (código JSCE - *Japan Society of Civil Engineers*- 1997). La resistencia de la parte curva varía también según la técnica utilizada para su realización, y según el tipo de resina y de fibra que hayan sido empleadas. La tabla 2.5 indica el diámetro que debe tener el doblado de acuerdo al diámetro de la barra. Esta tabla indica las recomendaciones dadas en el Reglamento ACI 318.

Tabla 2.11 Dobleces disponibles según el ACI

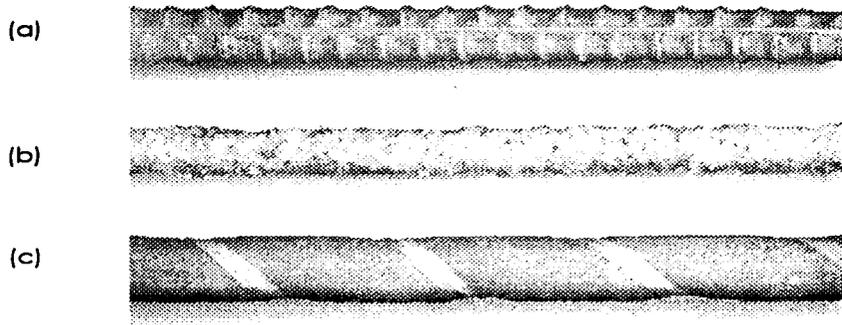
| #  | Diámetros |                                    |
|----|-----------|------------------------------------|
|    | (mm)      | Diámetro interno de curvatura (cm) |
| 2  | 6         | 7.5                                |
| 3  | 9         | 11.0                               |
| 4  | 12        | 11.0                               |
| 5  | 16        | 11.5                               |
| 6  | 19        | 11.5                               |
| 7  | 22        | 15.0                               |
| 8  | 25        | 15.0                               |
| 9  | 28        | 15.0                               |
| 10 | 32        | 15.0                               |

Fuente: Ficha Técnica Aslan™ 100 Rebar de Hughes Brothers

### 2.2.2.10 Superficie

Las barras de refuerzo FRP son producidas por varios procesos de manufactura, como los mencionados en el Capítulo 1. Cada método produce una condición de superficie diferente. La característica física de la superficie de la barra FRP es una propiedad importante para la capacidad de adhesión con el concreto. Existen tres tipos de patrones de superficie que comercialmente están disponibles, éstos se muestran en la figura 2.5.

<sup>11</sup> Ehsani, M.R., "Glass Fiber Reinforcing Bars", *Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete*, Inglaterra, 1993



**Figura 2.6** Superficies típicas de las barras FRP: (a) corrugada; (b) recubierta de arena; y (c) encamisada y recubierta con arena

#### 2.2.2.11 Durabilidad

Una de las razones principales que han llevado a considerar las barras de FRP adecuadas para ser usadas como refuerzo, la constituye su potencial durabilidad con respecto a las barras de acero. De cualquier manera, tratándose de un material relativamente nuevo (1995) para ser empleado como refuerzo para el concreto, no tenemos a disposición datos con prestaciones decenales. Estudios efectuados a las barras ASLAN™, en la Universidad Estatal de Pennsylvania, Iowa (USA) y la Universidad de Sherbrooke, Québec (Canadá), que consisten en baños acelerados de envejecimiento, han mostrado que luego de una vida de servicio simulada de 50 años, dichas barras presentaban una disminución de sólo el 16% de la resistencia a la tensión y un 4% de variación en el módulo de elasticidad<sup>12</sup>.

Las barras habían sido inmersas por 28 días en una solución saturada de hidróxido de calcio - Ca(OH)<sub>2</sub>, con pH iguales a 13 - a 80° C de temperatura.

<sup>12</sup> Ficha Técnica Aslan™ 100 GFRP Rebar de Hughes Brothers

## 2.3 Láminas y Tiras FRP

La forma más común de los compuestos FRP usada en aplicaciones estructurales es la lámina. Las láminas son hechas apilando varias capas delgadas de fibras y de una matriz de resina consolidándolas con el espesor deseado. Estas láminas pueden ser unidireccionales o cruzadas (quasi isotrópica), la orientación de las fibras en la construcción de la lámina se muestra en la Figura 2.7. Asimismo, la construcción general y la constitución de una lámina se ilustran en la Figura 2.8.

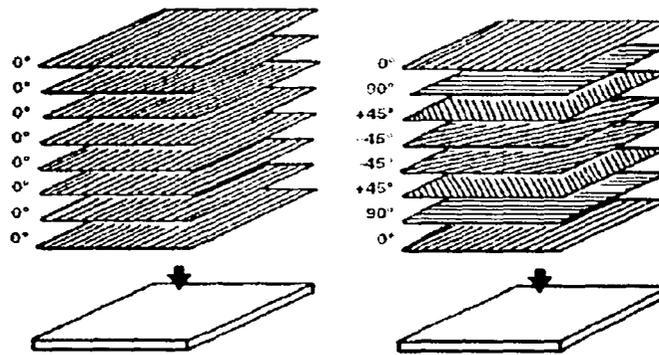


Figura 2.7 Orientación de las fibras en la construcción de la lámina

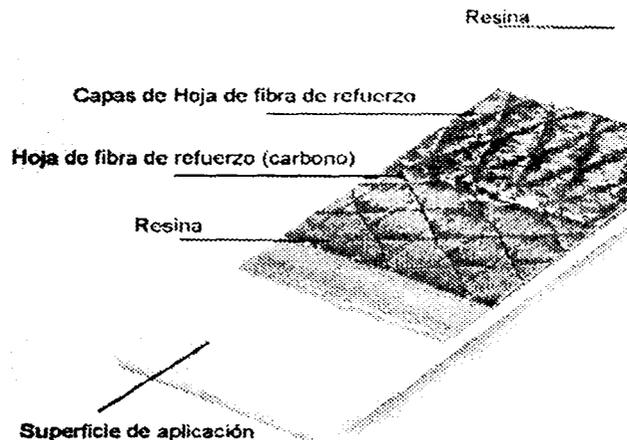


Figura 2.8 Configuración de la lámina FRP

Como se muestra en la Figura 2.8 las láminas de FRP pueden estar conformadas por varios tipos de refuerzo de fibra. Por lo general, y la presentación más usada para la realización de las láminas son las hojas de fibra, que comúnmente son colchonetas y telas o tejidos.

Las tiras FRP (también conocidas como platinas) tienen propiedades de desempeño definidas, se pueden encontrar en diferentes dimensiones para un óptimo diseño. Las tiras FRP pueden tener una aplicación muy parecida a la de las láminas, como se muestra en la figura 2.9.

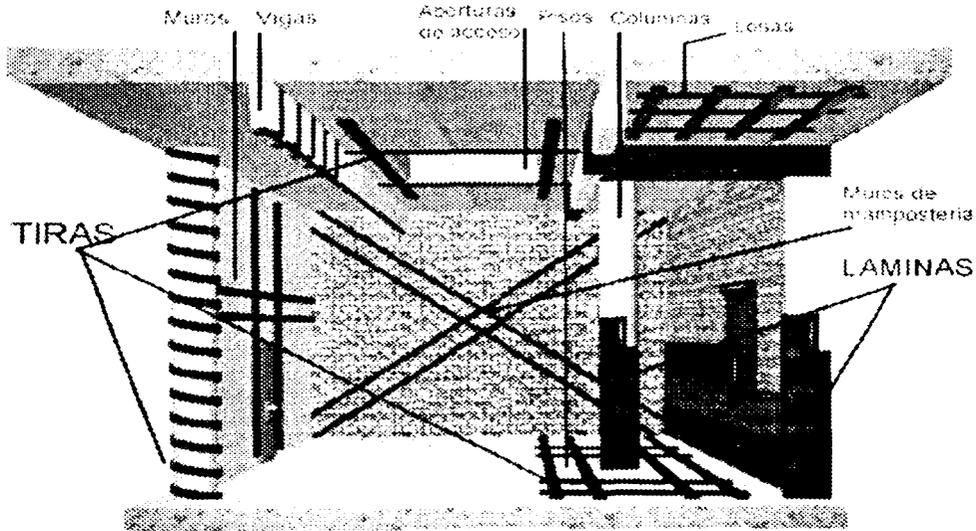


Figura 2.9 Elementos de aplicación de las láminas y tiras FRP

### 2.3.1 Propiedades Físicas y Mecánicas

Cuando la carga de trabajo es aplicada, las placas absorben los esfuerzos de tensión en forma proporcional con el acero de refuerzo. En la zona de compresión del concreto en la estructura existente debe haber una reserva de capacidad sin utilizar. La capa de adhesivo debe estar en capacidad de nivelar cualquier pico de esfuerzos. Entre mejor sea la nivelación mayor será la proporción de superficie del adhesivo con transmisión de carga.

Tabla 2.12 Propiedades de láminas de refuerzo FRP

|                       | Arquitectura de la lámina   | Espesor normal (por capa) | Resistencia de diseño | Módulo de tensión | Deformación a la rotura |
|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------------------------|
| FRPC Alta Resistencia | 300 g/cm-<br>Unidireccional | 0,165 mm/capa             | 3800 MPa              | 227 GPa           | 1,67 %                  |
| FRPC Alto Módulo      | 300 g/cm-<br>Unidireccional | 0,165 mm/capa             | 3500 MPa              | 333 GPa           | 0,94 %                  |
| FRPA                  | 600 g/cm-<br>Unidireccional | 0,279 mm/capa             | 2000 MPa              | 120 GPa           | 1,51 %                  |
| FRPV                  | 900 g/cm-<br>Unidireccional | 0,353 mm/capa             | 1520 MPa              | 72,4 GPa          | 2,10 %                  |

Fuente: Sistema Compuesto de Refuerzo M Brace™ 2002

El volumen de la fibra es generalmente el 70%, dejando a la resina el 30%. Como se ha mencionado anteriormente los materiales FRP no tienen un punto de fluencia, y las láminas no son la excepción y debido a esto no existe ruptura. La resistencia a la fatiga se considera sobresaliente. La Tabla 2.12 nos muestra algunas propiedades de las láminas FRP, se enlistan todos los materiales para poder hacer una comparación pertinente con respecto a éstas.

Ensayos de Materiales (EMPA) en Döbenford, Austria, dice que hoy día es posible reemplazar el acero (material pesado) por materiales de compuestos FRP, los cuales son ligeros a base de fibras sintéticas. Las láminas FRPC son las que poseen las mejores características mecánicas (resistencia a la tensión y alto módulo de elasticidad longitudinal) y químicas.

Las láminas FRP son una combinación de fibras de refuerzo con una matriz de resina epóxica, dispuestas longitudinalmente. Por lo tanto, en la dirección de la carga poseen una resistencia a la tensión y rigidez muy altas (Figura 2.10), así como también un comportamiento lineal hasta la ruptura, un desempeño excepcional a la fatiga y a la fluencia (creep), y una densidad muy baja. Por otro lado, se debe mencionar la importante resistencia química, al envejecimiento y a los rayos ultravioleta. La resistencia al esfuerzo cortante normal y transversal son bajas.

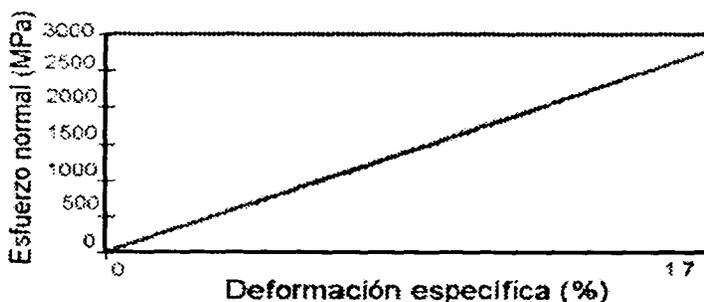


Figura 2.10 Diagrama de tensión / deformación de las láminas FRPC

Fuente: Sika, El rincón tecnológico, 2002

El principal obstáculo en el desarrollo de los conceptos de refuerzo de adherencia externa es asociado con el riesgo de perder la efectividad del FRP debido a eventos incontrolables. El

riesgo directo es el daño debido a exposición al fuego: las altas temperaturas en un incendio causarán que la fijación adhesivo/epóxico fluya plásticamente causando una pérdida de la carga transferida al FRP. Típicamente, las temperaturas críticas para el epóxico, generalmente relacionadas con HDT (temperatura de deflexión) o con  $T_g$  (temperatura de transición del vidrio) están en el rango de 49 °C a 93 °C. Tradicionalmente los materiales y los sistemas a prueba de fuego no pueden proteger de tales bajas temperaturas. En el reconocimiento de los riesgos por temperatura, los elementos a ser reforzados con laminas FRP deberán poseer una capacidad sin reforzamiento que proporcione un factor positivo de seguridad contra el colapso. La capacidad sin refuerzo deberá ser el resultado de una combinación dúctil de concreto y acero, ya que la estructura reforzada puede haber experimentado un agrietamiento inusual antes de la pérdida del FRP debido a la exposición a cargas superiores a las originalmente previstas.

El refuerzo a flexión está controlado por el módulo o rigidez del material ya que en general se trata de grandes claros con necesidad de limitación de las deformaciones. Por esta razón para el refuerzo a flexión se recomienda el uso de fibras de carbono por su alto módulo comparado con otros tipos de fibras.

La capacidad sin refuerzo deberá ser el resultado de una combinación dúctil de concreto y acero, ya que la estructura reforzada puede haber experimentado un agrietamiento inusual antes de la pérdida del FRP debido a la exposición a cargas superiores a las originalmente previstas. En elementos a flexión, por ejemplo, esto implica no solamente un adecuado acero a tensión para flexión, sino también la buena distribución de los estribos de acero, que "cuelgan" las cargas en la analogía del arco y que mantengan las fisuras lo suficientemente estrechas para permitir una apreciable transferencia de corte a través de las caras de la fisura<sup>13</sup>.

Los principios para la adhesión externa de tiras FRP a las estructuras de concreto son muy similares a los principios utilizados en la aplicación de placas de acero adheridas. En general, la resistencia a flexión, a corte o axial del elemento es incrementada por las aplicaciones externas del material de alta resistencia a la tensión.

Las tiras FRP son una combinación de fibras de refuerzo y una matriz de resina epóxica y tienen en dirección de la fibra una resistencia y rigidez muy altas, así como un comportamiento excepcional a la fatiga, mejor que la del acero y, además, su densidad es muy baja. Las fibras están colocadas en dirección longitudinal correspondiendo a la dirección de la sollicitación, de esta forma la tira FRP tiene una estructura unidireccional.

En la Figura 2.11 se muestra el diagrama carga – deflexión de diferentes configuraciones de tiras FRPC, resultado de experimentos realizados en reforzamiento de vigas T con carga estática.

---

<sup>13</sup> Guía de Diseño e Instalación, Tejidos SikaWrap™, Colombia, enero 2000

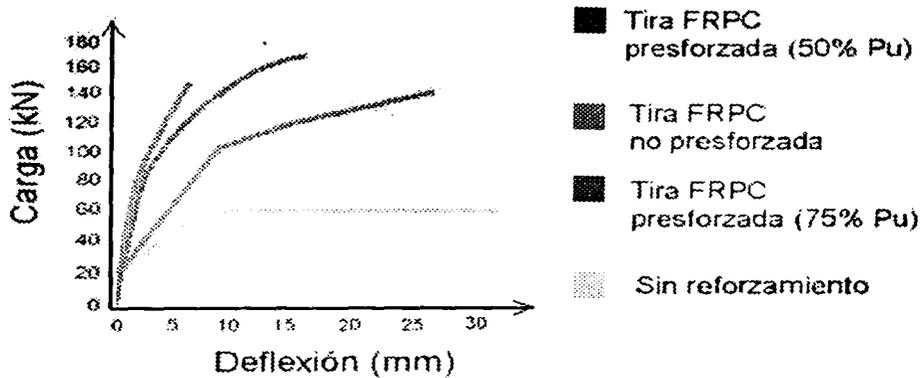


Figura 2.11 Diagrama Carga – Deflexión de diferentes tiras FRP

Fuente: Conceptos para los Sistemas de Reforzamiento, Sika™, 2002

Básicamente se distinguen tres tipos de tiras FRP: tipo S, tipo M y tipo H, de acuerdo a su módulo de elasticidad. Las dos primeras se utilizan para refuerzo de elementos de concreto y la otra para madera. Para cada tipo existe una denominación de acuerdo a las dimensiones de la sección transversal. Por ejemplo la tira tipo S512 tiene 5 centímetros de ancho y 1.2 mm de espesor. La tira tipo S tiene un módulo menor al del acero, por lo tanto se obtienen mayores deformaciones que con el uso de la tira tipo M. Con el uso de la platina tipo M es de esperarse una mayor cantidad de fisuras y de menor tamaño.

Las placas o tiras metálicas se pueden caer por causa de la corrosión, mientras que las de FRP por el contrario no se corroen, además, son resistentes a la mayoría de los químicos, al envejecimiento y a los rayos ultravioleta. Al respecto de la incidencia de los rayos ultravioleta UV, éstos no afectan a la fibra pero tienden a decolorar el adhesivo y la matriz epóxica y se puede transmitir calor excesivo a la adhesión.

Por lo tanto en caso de incidencia de los rayos UV se recomienda recubrir la lámina con una pintura (blanca) o con un mortero de protección. Las tiras FRP se consiguen en longitudes variables y se pueden transportar en rollos.

La resistencia en dirección transversal a las fibras así como la resistencia a cortante son bajas. Tienen excelente resistencia a la fluencia plástica. Las características mecánicas en dirección longitudinal son determinadas por el tipo de fibra y por el contenido en volumen de fibras. En la figura 2.12 están representados los diagramas de esfuerzo – deformación de diferentes tiras FRP.

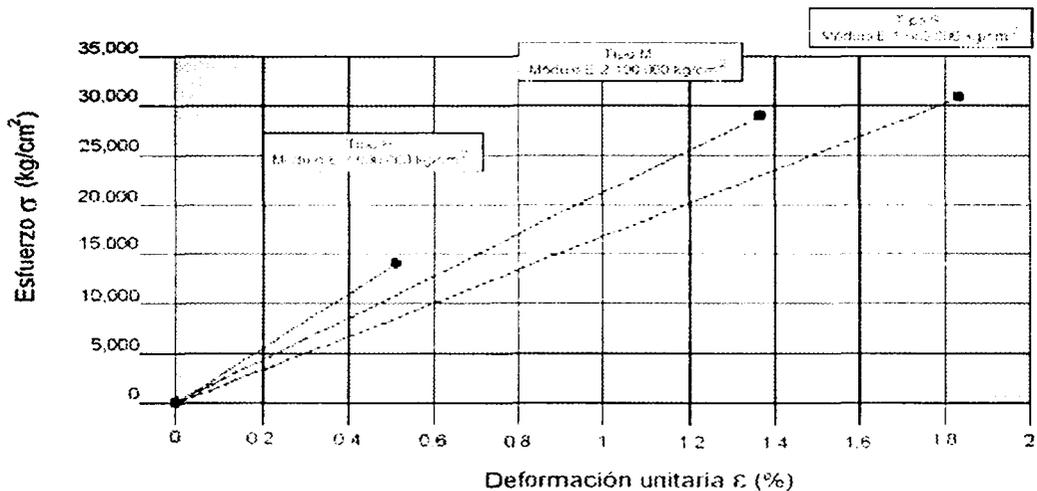


Figura 2.12 Diagrama Esfuerzo Deformación de las diferentes tiras FRP

Fuente: Guía de Diseño Sika™ Carbodur™, 2000

Según ensayos de la Federation Internationale de la Precontrainte, las resistencias mecánicas de las tiras FRP a 10 días y con una temperatura de 15°C a compresión tienen aproximadamente 950 kg/cm<sup>2</sup>; a tensión 280 kg/cm<sup>2</sup>; al corte 150 kg/cm<sup>2</sup> (falla al concreto); adherencia en húmedo 40 kg/cm<sup>2</sup> (falla el concreto); contracción del 0.04%; temperatura de transición de vidrio de 62 °C; módulo de elasticidad de 128.000 kg/cm<sup>2</sup>; y un coeficiente de expansión térmica lineal de  $9 \times 10^{-5} 1/°C$  (-10°C + 40°C). La Tabla 2.13 nos muestra algunas propiedades de los diferentes tipos de tiras FRP

Tabla 2.13 Propiedades de las diferentes tiras de FRP

|                                                                          | Tipo S      | Tipo M      | Tipo H      |
|--------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Módulo de Elasticidad<br>kg/cm <sup>2</sup> (N/mm <sup>2</sup> )         | ~ 1.650.000 | ~ 2.100.000 | ~ 3.000.000 |
| Resistencia a la tensión<br>kg/cm <sup>2</sup>                           | ~ 28.000    | ~ 24.000    | ~ 13.000    |
| Valor medio de resistencia a la tensión a ruptura*<br>kg/cm <sup>2</sup> | 30.500      | 29.000      | 14.500      |
| Deformación unitaria a la ruptura                                        | > 1,7 %     | > 1,1 %     | >0,45 %     |
| Densidad, gr/cm <sup>3</sup>                                             | 1,5         | 1,6         | 1,6         |

\*En la dirección longitudinal de la fibra  
Fuente: Guía de Diseño Sika™ Carbodur™, 2000

*[Faint, illegible text at the top of the page]*

*[Faint, illegible text in the upper middle section]*

*[Faint, illegible text in the middle section]*

*[Faint, illegible text]*

*[Faint, illegible text in the lower middle section]*

*[Faint, illegible text]*

*[Faint, illegible text in the lower section]*

*[Faint, illegible text at the bottom of the page]*

Actualmente no existen reglas claras para el diseño del concreto con refuerzo FRP. El Instituto Americano del Concreto (ACI) Comité 440-F está desarrollando un documento (ACI 440F-99, 1999), para proporcionar recomendaciones de diseño y técnicas de construcción para el uso de FRP para el reforzamiento del concreto. El documento resumirá el estado del arte existente y la filosofía fundamental de diseño. Sin embargo, está por definirse una metodología explícita para el manejo de muchos aspectos importantes, como el uso de los factores apropiados de seguridad, la baja ductilidad de los componentes FRP y aspectos sobre anclaje-desarrollo.

## 2.4 Factores que afectan las propiedades mecánicas

---

Las propiedades mecánicas de los compuestos dependen de muchos factores incluyendo la duración y la historia de la carga, temperatura y humedad. Estos factores son independientes, y consecuentemente es difícil determinar el efecto de cada uno por separado mientras los otros ocurren constantemente.

### 2.4.1 Humedad

La absorción excesiva de agua en los compuestos puede resultar en una pérdida significativa de la resistencia y rigidez. La absorción de agua produce cambios en las propiedades de la resina y puede causar inflamamiento y alabeo en los compuestos. Es muy importante que las propiedades mecánicas requeridas de un compuesto sean determinadas bajo las mismas condiciones ambientales donde el material será usado. Existen resinas contra humedad y son usadas en estructuras donde se espera este mojada todo el tiempo.

### 2.4.2 Fuego y Temperatura

Muchos de los compuestos tienen de buenas a excelentes propiedades a temperaturas elevadas. La mayoría de los compuestos no se quema tan fácilmente. El efecto de la alta temperatura es más severo en la resina que en la fibra. Las resinas contienen grandes cantidades de carbón e hidrógeno, los cuales son flamables y se sigue buscando el desarrollo de resinas resistentes al fuego.

El problema del fuego en los miembros de concreto reforzado con compuestos FRP es diferente de otros materiales compuestos sujetos al fuego directo. En este caso, el concreto sirve de barrera para proteger el FRP del contacto de la flama directa. Por otro parte, mientras la temperatura en el interior del miembro incrementa, las propiedades mecánicas del FRP pueden cambiar significativamente. Es, además, recomendado que el usuario obtenga información del comportamiento particular de un refuerzo FRP y del sistema de resina a temperaturas elevadas cuando las probabilidades de fuego son altas.

### 2.4.3 Rayos Ultravioleta

Los compuestos pueden ser dañados por los rayos ultravioleta presentes en la luz solar. Estos rayos causan reacciones químicas en la matriz de polímero, la cual puede conducir a la degradación de las propiedades. Este problema puede ser solucionado, con la inducción de aditivos apropiados a la resina, este tipo de daño no es relevante cuando el FRP es usado como un refuerzo interno en las estructuras de concreto y, además, no expuestos a los rayos solares.

### 2.4.4 Corrosión

El refuerzo de acero se corroe y el incremento del volumen produce grietas en el concreto para acelerar su deterioramiento. La mayor ventaja de los materiales compuestos es que no se corroe. Debe también notarse que los compuestos pueden ser dañados como resultado de la exposición a ambientes agresivos. Mientras las barras FRPV tienen gran resistencia a los ácidos, éstas pueden ser deterioradas en un ambiente alcalino. En un estudio reciente de aplicaciones de concreto presforzado, un tipo particular de barras FRP vidrio – epóxico embebido en concreto fue sometido a una simulación con agua salada, de lo que resultó en una pérdida de resistencia <sup>14</sup>.

---

## 2.5 Métodos de Prueba

---

Mientras las pruebas estándar han sido establecidas para determinar las propiedades de los materiales tradicionales de construcción como el acero y el concreto, éstas no pueden ser usadas para los materiales FRP. Esto es cierto para aplicaciones de ingeniería civil, donde el uso de los compuestos FRP está en su primera etapa. Por lo tanto, se requiere que las condiciones exactas de carga sean determinadas con anticipación y las características del material que correspondan a esas condiciones sean negociadas y obtenidas con el fabricante.

Los métodos de prueba son importantes para evaluar las propiedades de la resina, fibra, compuesto FRP y componentes estructurales. Las reglas ASTM (American Society of Testing and Materials) dividen los métodos de prueba en dos, uno concerniente a los compuestos de vidrio FRP y otro concerniente a los compuestos de alto módulo como las fibras de carbono.

### 2.5.1 Barras de compuestos de vidrio (FRPV)

*Prueba de Tensión.* - Las barras pultruidas hechas con fibras de vidrio continuas y con diámetros desde 3.2 hasta 25.4 mm pueden ser probadas usando la norma ASTM D 3916 Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Plastic Rod como se muestra en

---

<sup>14</sup> Sen, R. El al, " Durability of Fiberglass Pretensioned Beams", Revista Estructural ACI, septiembre – octubre, 1993

la Figura 2.13. Esta prueba determina el esfuerzo último, módulo de elasticidad, porcentaje de elongación, deformación última y relación de Poisson.

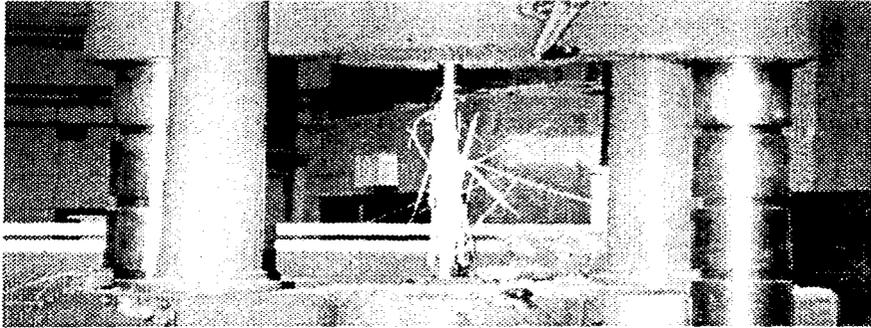


Figura 2.13 Prueba de tensión a las barras FRPV

*Prueba de resistencia a flexión.*- Las pruebas de esfuerzo a flexión en barras pultruidas FRPV pueden ser llevadas a cabo con la norma ASTM D 4476 Standard Test Method for Flexural Properties of Fiber Reinforced Pultruded Plastic Rods. Esta prueba nos da el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad.

*Prueba de esfuerzo cortante horizontal.*- Para las barras FRPV se debe utilizar la norma ASTM D 4475 Standard Test Method for Apparent Horizontal Shear Strength of Pultruded Reinforced Plastic Rods By The Short-Beam Method, que consiste en una viga pequeña.

También existen normas de prueba para la relajación, aplastamiento y pruebas no destructivas.

### 2.5.2 Barras de compuestos de carbono (FRPC)

Los métodos de prueba para las barras FRPV pueden ser usados para las barras FRPC, pero pueden no ser capaces de alcanzar los niveles de esfuerzo que son requeridos para la falla a tensión. Los métodos de prueba usando mordazas pueden determinar el esfuerzo a tensión, módulo de elasticidad y deformación última.

*Cortante horizontal y flexión.*- Los métodos de prueba para los compuestos FRP de alto módulo no están considerados por la ASTM, pero los métodos utilizados para las barras FRPV pueden ser usados las barras pultruidas de carbono.

### 2.5.3 Láminas y tiras FRP

Las placas laminadas de vidrio o carbono pueden ser probadas a tensión, compresión, flexión, fatiga, aplastamiento y relajación usando los métodos ASTM: D 3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (*tensión*), D 3410 Standard Test Method

for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading (*compresión*), D790 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (*flexión*), D 3479 Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials (*fatiga*), D 2990 Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics (*aplastamiento*) y D 2991 Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics (*relajación*).

#### 2.5.4 Cables FRP

Los cables de compuesto son hechos generalmente hechos por muchas barras FRP pultruidas de pequeño diámetro. Un problema para determinar las propiedades a tensión de los cables es la sujeción del mismo sin causar la falla del anclaje. Estos anclajes se encuentran en desarrollo y la mayoría de ellos usan resinas poliméricas con un tubo de metal.

Los métodos de prueba son necesarios para determinar las propiedades de los productos FRP. Los resultados de las pruebas son usados para el control de calidad durante la producción y el uso en campo. De esto, que los métodos de prueba deben ser reproducibles y confiables. Las variaciones en los procedimientos de prueba y geometría de los especímenes deben llevar una correlación. Los métodos estadísticos son necesarios para establecer las propiedades de las barras, placas y cables. Otras pruebas pueden tomar en cuenta los cambios ambientales como a temperatura y humedad, que deben ser incluidos para evaluar las propiedades de los FRP.

## 2.6 Comparación de materiales (FRP vs. materiales convencionales)

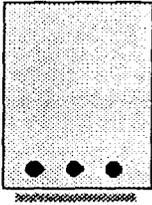
Debido a la gran variedad de propiedades que existen para las fibras y las matrices, sólo se pueden tener un rango determinado de combinaciones de fibra – polímero. Las fibras pueden ser como se ha venido mencionando de varios materiales (por ejemplo: vidrio, carbono, aramida), los cuales tienen una gran variedad de resistencias y rigideces y estos a su vez pueden realizarse de varias formas. Como se ha venido viendo a lo largo de este trabajo, podemos identificar algunas diferencias de los materiales. A continuación se hará de forma más explícita.

Las láminas de refuerzo unidireccional con fibras de alto desempeño generalmente exhiben un comportamiento elástico lineal a la falla, dependiendo de la dirección en donde se aplique la carga con respecto a la orientación de la fibra. Las láminas FRPV tienen mayor resistencia a la tensión y mayor módulo que la madera, el acero, el aluminio o el concreto <sup>15</sup>. Las láminas de FRPC tienen una resistencia a la tensión específica (relación resistencia a tensión – densidad del material) de aproximadamente 4 – 6 veces mayor y un módulo específico (relación módulo –

<sup>15</sup> *Structural Plastics Selection Manual*, ASCE Manuals and Reports on Engineering, 1985

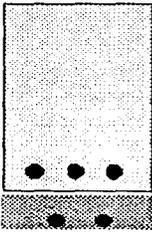
densidad del material) 3.5 – 5 veces mayor que el acero o el aluminio <sup>16</sup>. Los materiales FRP no poseen un alto grado de ductilidad y exhiben muy poca fluencia antes de la falla. En términos de fatiga, la mayoría de los materiales FRP no exhiben ningún límite de fatiga. También ha sido observado que los ciclos de carga con frecuencia alta pueden generar calor interno, el cual no se disipa.

Para una viga simplemente apoyada se desea incrementar la carga viva en un 35%, y tenemos tres opciones para hacerlo, el siguiente ejercicio fue desarrollado para el Sistema MBrace<sup>TM</sup> de MBT.



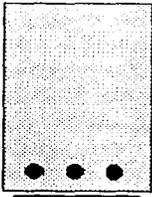
#### **Placa de Acero**

- Placa de 3/16 "
- Carga muerta de 115 kilogramos
- Colocada con montacargas y pernos



#### **Incremento de la sección**

- 2 varillas #8 y 10 cm de concreto
- Carga muerta de 1135 kilogramos
- Cimbra, colado y curado



#### **Lámina de FRPC**

- 1 capa pegada
- Carga muerta de 2.75 kilogramos
- Colocada a mano

En la construcción nueva, el refuerzo más común es el acero de refuerzo (barras, cables, tendones de presfuerzo), por lo que en la Tabla 2.14 se muestran las propiedades de algunos materiales FRP y el tradicional acero.

<sup>16</sup> ASM Engineered Materials Handbook, vol. 1, ASM International, 1993

Tabla 2.14 Comparación de las propiedades mecánicas (dirección longitudinal)

|                                                           | Barra de Acero | Tendón de Acero | Barra FRPV  | Tendón FRPV  | Tendón FRPC  | Tendón FRPA  |
|-----------------------------------------------------------|----------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Esfuerzo a tensión, MPa                                   | 483 - 620      | 1379 - 1862     | 517 - 1207  | 1379 - 1724  | 165 - 2410   | 1200 - 2068  |
| Esfuerzo de fluencia, MPa                                 | 276 - 414      | 1034 - 1326     | No aplica   |              |              |              |
| Módulo de elasticidad a tensión, GPa                      | 200            | 186 - 200       | 41 - 55     | 43 - 62      | 152 - 165    | 50 - 74      |
| Elongación última, mm/mm                                  | +0.10          | +0/04           | 0.05 - 0.05 | 0.03 - 0.045 | 0.01 - 0.015 | 0.02 - 0.026 |
| Esfuerzo a compresión, MPa                                | 276 - 414      | N/D             | 310 - 482   | N/D          | N/D          | N/D          |
| Coefficiente de expansión térmica, (10 <sup>-7</sup> /°C) | 11.7           | 11.7            | 9.9         | 9.9          | 0.00         | -1.00        |
| Densidad                                                  | 7.9            | 7.9             | 1.5 - 2.0   | 2.4          | 1.5 - 1.6    | 1.25         |

Nota: Todas las propiedades se refieren al refuerzo unidireccional. Las propiedades pueden variar con el volumen de fibra (45 - 70%), diámetro y sistema de anclaje.

N/D = No Disponible

Fuente: Manual of Concrete Practice, ACI 2001

Debido a la naturaleza viscoelástica de los materiales poliméricos, los efectos debido al tiempo están muy presentes en los compuestos FRP, los cuales no ocurren en las construcciones con materiales tradicionales. Los materiales FRP tienen una mayor tendencia que el acero y el concreto a llegar a la fluencia plástica bajo cargas sostenidas a largo plazo<sup>17</sup>. La aparente rigidez y resistencia del FRP puede disminuir lentamente a través del tiempo. Además, la rigidez y la resistencia del material FRP son dependientes de la cantidad de carga.

En la Tabla 2.15 se compara de manera cualitativa de propiedades físicas, mecánicas y de manejo, que es una de las grandes ventajas que tienen los FRP sobre los materiales convencionales usados en la construcción.

<sup>17</sup> Holloway, L.C., "Polymers and Polymer Composites in Construction", Thomas Telford, 1990

Tabla 2.15 Comparación cualitativa de las tiras FRP vs. tiras tradicionales

| CRITERIO                   | REFUERZO CON TIRAS FRP               | REFUERZO CON BANDAS DE ACERO                     |
|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Peso propio                | Bajo                                 | Alto                                             |
| Resistencia a la tensión   | Muy alta                             | Alta                                             |
| Espesor                    | Muy bajo                             | Bajo                                             |
| Corrosión                  | Ninguna                              | Si                                               |
| Longitud de las bandas     | Cualquiera                           | Limitada                                         |
| Manejo                     | Flexible, fácil                      | Difícil, rígido                                  |
| Capacidad de carga         | En dirección longitudinal únicamente | En cualquier dirección                           |
| Cruces                     | Fácil                                | Complejo                                         |
| Comportamiento a la fatiga | Sobresaliente                        | Adecuado                                         |
| Costo de materiales        | Alto                                 | Bajo                                             |
| Costo de instalación       | Bajo                                 | Alto                                             |
| Aplicación                 | Sin herramientas                     | Con equipos de elevación y elementos de fijación |

Fuente: Guía de diseño SikaWrap™, 2000

Los coeficientes de expansión térmica lineal de los compuestos FRPV son comparables con los de alguna aleación de aluminio, pero mayores que el acero y el concreto<sup>16</sup>. Las propiedades de corrosión frecuentemente se dice que son superiores a las de los metales los cuales se oxidan, pero la matriz de resina de un FRP absorbe humedad, así como las fibras de aramida. Esto es una evidencia que las fibras de vidrio tienden a degradarse con la humedad<sup>16</sup>. La exposición ultravioleta, mientras no exista algún efecto significativo en las propiedades del acero o el concreto, corroe las matrices orgánicas a través del tiempo. La interacción de tiempo, temperatura, esfuerzo mecánico y otras condiciones ambientales como la humedad, rayos UV y ciclos de congelamiento y descongelamiento afectan el comportamiento estructural de los FRP aún más que cualquier otro material de construcción.

<sup>16</sup> Randazo, C.A., "Composites Break Another Record in 1994", Annual Conference Composites Institute, 1995

## APLICACIONES Y USOS

Hace no mucho tiempo, los materiales de Compuestos FRP eran considerados como de la "era del espacio", utilizados sólo en los transbordadores espaciales y aviones de caza. Este material tan versátil se ha convertido en parte de nuestra vida diaria y son usados hoy en día como parte de nuestra rutina en automóviles, botes, clubes de golf, bicicletas, componentes de computación, chalecos antibalas y miles de productos más. Los compuestos FRP también nos dan soluciones prácticas a la ingeniería civil en los retos de restauración estructural integral, incremento de las capacidades de carga y aumento de resistencia y rigidez de estructuras antiguas. La ventaja de los compuestos es la variedad de los sistemas de resinas y fibras que nos permiten una solución la mayoría de las veces. Dependiendo del producto y la aplicación, el uso de los productos FRP para la infraestructura y construcción civil plantea diversas soluciones.

- El diseño del producto y del sistema pueden ser optimizados para cargas específicas.
- Con la reducción en las dimensiones de la estructura por cargas muertas, se puede aumentar los valores de carga en estructuras ya existentes.
- Costos de mantenimiento reducidos debido a la resistencia al descongelamiento y otros agentes corrosivos.
- El sistema en paquetes reduce el tiempo de instalación en campo.
- La rápida construcción reduce los retrasos en el tráfico.
- Seguridad de los sistemas prediseñados.
- Aumento de la durabilidad y características de fatiga que han sido probadas en otras industrias.
- Los sistemas y productos permiten un valor agregado a la ingeniería que resulta en instalaciones eficientes e innovadoras.

Muchos productos FRP se encuentran disponibles para reparar o reemplazar las estructuras existentes. Muchos de ellos han sido usados extensivamente y demostrado su eficacia en todo el mundo. Algunos ejemplos de los productos de compuestos FRP son:

- Nuevas formas estructurales aplicadas a vigas para plataformas de puentes.

- **Sistemas de puentes vehiculares y peatonales.**
- **Barras y tendones de FRP para refuerzo de concreto.**
- **Sistemas y productos de pilotaje para estructuras marinas.**
- **Sistemas de compuestos FRP para reparar, reforzar y rehabilitamiento sísmico para vigas, columnas, losas y muros.**
- **Barras de unión para pavimentos de concreto en carreteras.**

## **3.1 Aplicaciones Estructurales**

---

### ***3.1.1 Plataformas para puentes vehiculares***

Hoy en día, los propietarios de los puentes se enfrentan a retos únicos como resultado del deterioro de la infraestructura, baja inversión de capital y la demanda pública. Se busca la reparación o el remplazamiento de los puentes a bajo costo, con una rápida instalación para reducir el impacto en su rehabilitamiento. Además, el rehabilitamiento de los puentes hoy en día frecuentemente requiere de aumentos de cargas por arriba de las cuáles el puente estaba diseñado inicialmente, para distribuir el incremento de la carga viva.

Estas demandas han resultado en un mercado de remplazamiento de plataformas, creando así tremendas oportunidades para los materiales FRP en plataformas de puentes. Las ventajas de todas las tecnologías desarrolladas para las plataformas de puentes son comunes: capacidad de carga, propiedades anticorrosivas y peso reducido sobre el concreto. Muchas plataformas de puentes han sido sustituidas como resultado de una excesiva corrosión en el concreto debido al descongelamiento y otros agentes; una plataforma FRP asegura que esos problemas no se presentarán en el futuro.

El peso reducido de las plataformas FRP ofrece muchas ventajas incluyendo un fácil manejo y la reducción de carga muerta. En general, la reducción de la carga muerta en un sistema de soporte a base de largueros existente, significa mayor capacidad para soportar cargas vivas y aumentar la carga total del puente.

Cada productor de plataformas ha desarrollado sistemas para aplicaciones especiales. Las tecnologías van desde un perfil bajo capaz de tener claros arriba de 90 cm, plataformas profundas con claros de 2.75 metros entre los largueros y el sistema de plataformas que pueden ser personalizadas en la longitud de su claro. Las tecnologías de las plataformas también van de ser diseñadas para cargar totalmente la acción compuesta entre los largueros de soporte y las plataformas para ser estructuralmente no compuesta en su comportamiento. El uso de una capa de recubrimiento es necesaria para las plataformas FRP.

Cada plataforma es construida en fabrica por ingenieros y personal experimentado en la tecnología FRP. La prefabricación de las plataformas FRP fuera del sitio resulta en el aseguramiento de calidad y deja la construcción de la plataforma fuera de la ruta crítica de la construcción. El producir las plataformas fuera del sitio de trabajo son una ventaja en el costo y

la reducción del peso nos da una disminución en el tiempo de construcción, así como, equipo de construcción más ligero en el sitio. En general, donde los costos del ciclo de vida son considerados, una plataforma FRP será más competitiva que una de acero o concreto con respecto al costo.

Los productos y materiales FRP serán una parte integral dentro del mercado de los puentes basado en sus propiedades y su resistencia a la corrosión. Como ingenieros y contratistas se vuelve más familiar con las ventajas de estas tecnologías, sus aplicaciones se desarrollaran firmemente como en otras industrias en los últimos 50 años.

La mayoría de los sistemas de plataformas FRP que se encuentran disponibles en el mercado están enfocadas a plataformas con claros de 2.5 a 3.65 metros entre vigas. Estos claros son típicos en los pasos superiores o puentes en las carreteras que tienen plataformas de concreto y que necesitan reemplazo de la misma.

La mayoría de las plataformas FRP para puentes están constituidas de un corazón o núcleo (core) de espuma, paneles de baja densidad y los recubrimientos de fibra de vidrio, poniendo en práctica la tecnología de estructura sándwich. El corazón o núcleo está reforzado en la dirección Z con hilo itinerante de fibra de vidrio y los recubrimientos con colchoneta. Estas plataformas son competitivas en costo con las plataformas convencionales de acero corrugado.

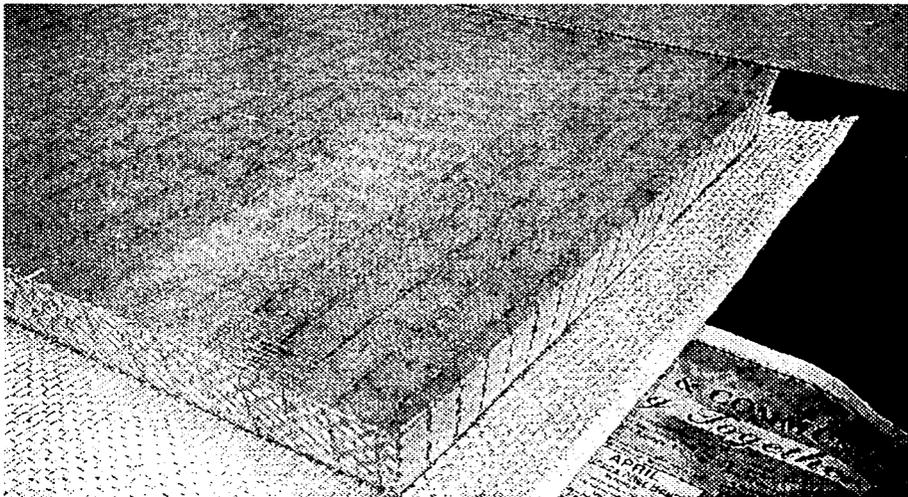


Figura 3.1 Plataforma FRP para puentes vehiculares

Algunas características fundamentales de las plataformas son:

- Perfil delgado de plataforma – espesor nominal de 84 mm sin la superficie de rodamiento
- Alta resistencia y durabilidad – 36.3 toneladas de esfuerzo final

- Ligera – 35 kg/m<sup>2</sup> a 107 kg/m<sup>2</sup> , pesos del 15 al 20% menos que los materiales convencionales como concreto y acero
- Paneles largos – 2.5 metros x ancho total del puente (9 – 11 metros)
- Costo competitivo
- Instalación rápida y simple – instalación en sitio o en planta, toma algunas horas contra días por otros métodos
- Los paneles que conforman la plataforma son atornillados o pegados con adhesivos a las vigas
- Compatible con todas las superficies de rodamiento – asfalto, concreto polimérico
- Diseñadas de acuerdo a las especificaciones AASHTO
- Barandales adjuntos a las vigas
- Los módulos de construcción son entregados en camiones para su rápida instalación
- Alta resistencia a la fatiga y relación resistencia – peso
- No contiene ningún refuerzo metálico, por lo que elimina la corrosión y el mantenimiento

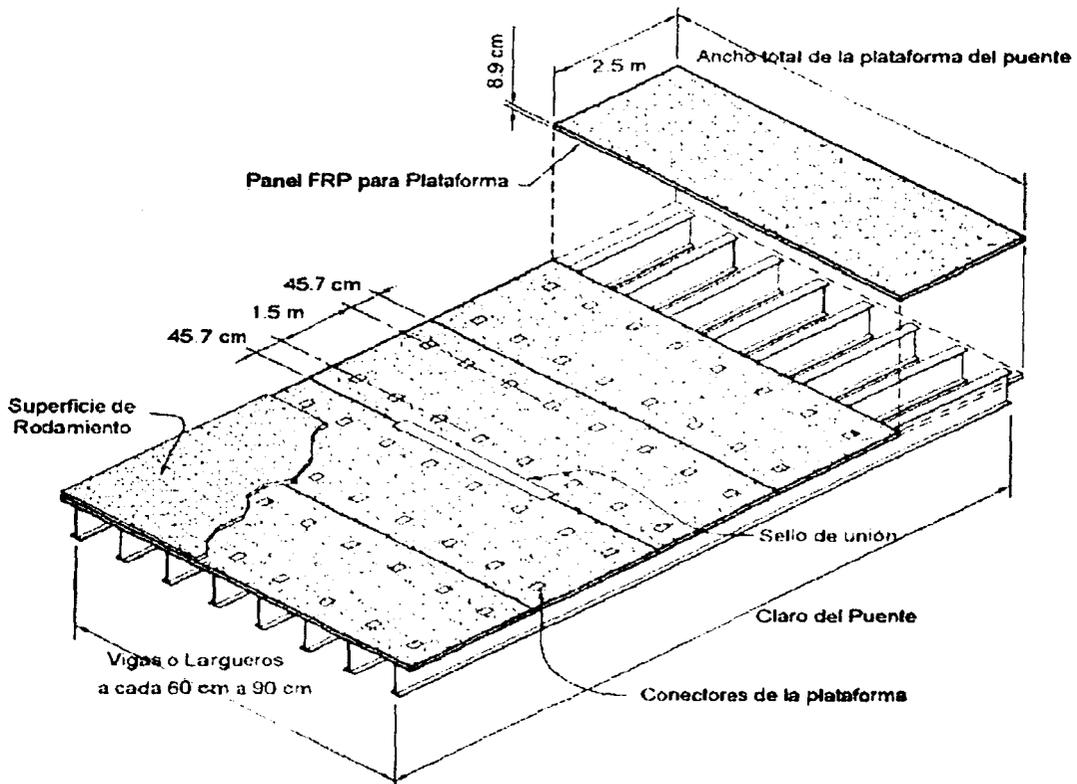


Figura 3.2 Esquema de instalación y configuración de las plataformas FRP

Las conexiones de las plataformas de FRP son simplificadas enormemente, ya que la aplicación del producto es para puentes que no han sido diseñados para recibir una plataforma FRP, pero que cuentan con una superficie plana.

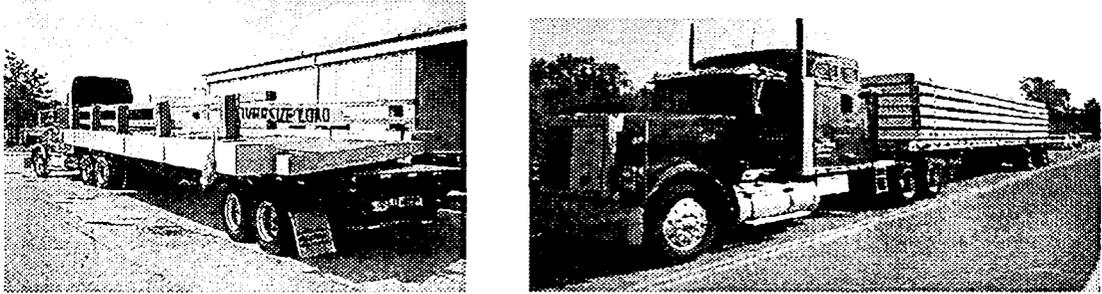


Figura 3.3 Transportación de un panel completo de 12 metros x 5 metros y de varios paneles

Para la instalación no se necesita perforar o penetrar las vigas de soporte, ya que se sujetan con abrazaderas y unos conectores. Existen varios tipos de soporte, como panel – viga, panel – panel y panel – empalmes.

También los módulos de las plataformas de FRP son adheridos entre si, así como a las vigas de soporte con un adhesivo de alta resistencia, por lo general se utiliza poliuretano o su equivalente.



Figura 3.4 Unión de los módulos de la plataforma

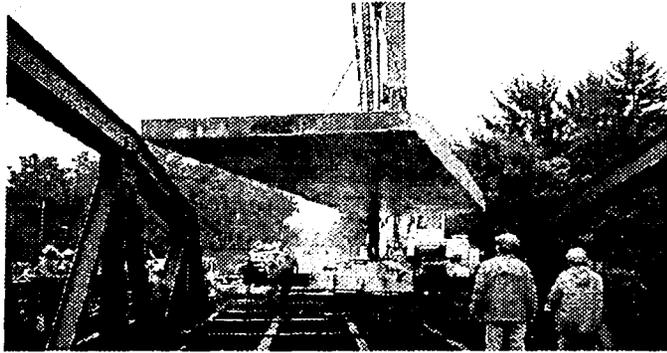


Figura 3.5 Rehabilitación de un puente de gran claro con plataforma de compuestos

### 3.1.2 Puentes peatonales

Muchos de los retos a los que se enfrentan los constructores de puentes peatonales son en muchos casos similares a los de los puentes vehiculares. Estos puentes frecuentemente son corridos. En los casos donde inicialmente las plataformas son construidas con concreto, para la sección profunda hay menos opciones para su reparación, siendo el reemplazamiento de la plataforma la única opción. La rapidez de la corrosión en puentes peatonales construidos en madera puede ocurrir aún más rápido que en el concreto. Como los puentes peatonales tienen miembros estructurales en los marcos más ligeros, su susceptibilidad a la corrosión es tal, que el reemplazamiento de la plataforma es la forma más viable.



Figura 3.6 Puente peatonal en el Parque Nacional de Maui,

### Hawai con un claro de 25 metros

Hay un gran número de beneficios al construir un puente peatonal con FRP. Estos puentes pueden ser colocados por arriba de las zonas donde existe un gran volumen de tráfico o en áreas recreativas con accesos limitados. Es estas circunstancias, el equipo usado para instalar un puente peatonal busca tener el menor impacto en el tráfico habitual o en los alrededores del sitio de trabajo. Muchos de los puentes peatonales FRP son construidos con un gran control de calidad, ensamblados fuera del sitio (offsite) y transportados como una sola unidad. En general, se simplifica la instalación de la estructura con la ventaja del uso de los materiales ligeros FRP que minimizan el uso de equipo pesado. El tiempo de vida útil de un puente peatonal es también muy importante en muchos proyectos en los cuales el acceso al sitio no está frecuentemente listo al inicio de la construcción.

En el mundo se han construido más de 100 puentes peatonales FRP, donde la empresa Tectonics ha desarrollado procedimientos y especificaciones para este tipo de estructuras que abarcan estructurales peatonales, para bicicletas, para vehículos ligeros y pasarelas.

La tecnología de puentes peatonales FRP dan al sistema que conforma el puente una relación resistencia – peso mayor que el acero, ofreciendo significantes ventajas en el diseño y la erección. Los sistemas de puentes incluyen perfiles estructurales como vigas, secciones de canal, ángulos y tubos. Las características esenciales son:

- Alta resistencia - Los sistemas tienen resistencias entre 205 MPa y 415 MPa.
- Ligero – Los componentes son fácilmente transportados, sus piezas no exceden los 41 kilogramos.
- Construcción de los componentes – Los puentes pueden ser enviados parcialmente o completamente ensamblados y totalmente desarmados, todo esto depende de las condiciones del sitio de trabajo.
- Fácil Instalación – los puentes están diseñados para una rápida y fácil instalación y ensamble. Los claros normales, menores a 15 metros pueden ser instalados por 3 personas, usando herramientas de mano en menos de un día.
- Bajo Mantenimiento – Los puentes FRP tienen un buen comportamiento ante ambientes agresivos que puedan deteriorar rápidamente los materiales. Lugares mojados, termitas, sal y la mayoría de ambientes químicos no tienen ningún efecto en este material. Además no son conductivos eléctricamente por lo que los hace fácil de limpiar.
- Apariencia Atractiva – Los puentes pueden ser fabricados en cualquier color. Este color está dentro del compuesto, por lo que no necesita pintura.

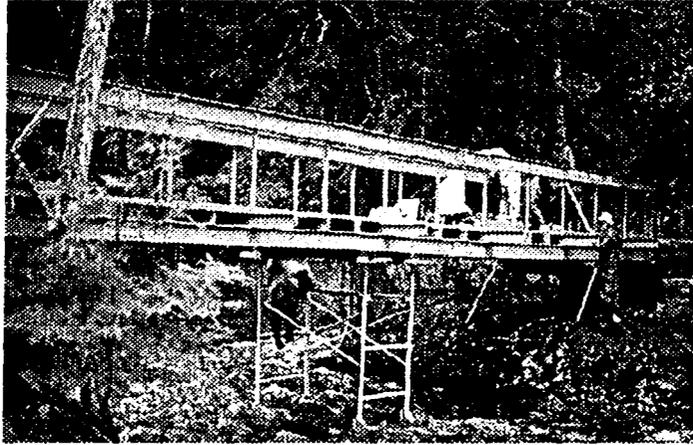


Figura 3.7 Ensamble en sitio

Las plataformas pueden ser de madera de pino o de FRP, las cuales tienen una carga de  $415 \text{ kg/m}^2$  en puentes para personas y bicicletas, en puentes con claros de más de 15 metros tienen  $295 \text{ kg/m}^2$ .

Estos puentes son diseñados considerando varios factores, como vibración, viento, carga viva, carga muerta y cargas sísmicas.



Figura 3.8 Instalación por Helicóptero de un puente de 21.5 metros de claro

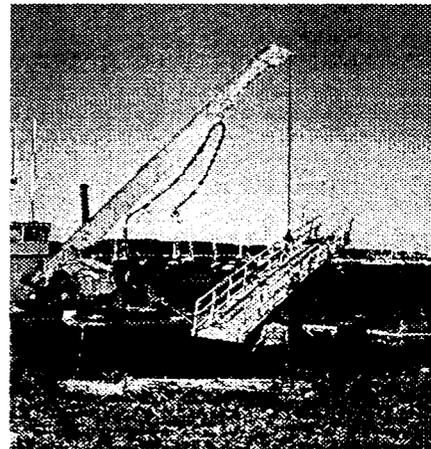


Figura 3.9 Instalación con una pequeña grúa de un puente de 12 metros de claro

### 3.1.3 Otros

Además han documentado muchos proyectos de componentes estructurales en los últimos años. Algunos ejemplos son edificios que contienen equipo eléctrico – electrónico, plataformas de aterrizaje para helipuertos, torres de enfriamiento, así como los mencionados anteriormente.

También existen otros usos estructurales potenciales como cables, estacionamientos, plantas químicas e instalaciones para plantas de tratamiento de aguas residuales.

## 3.2 Sistemas de refuerzo externo Reparación, Reforzamiento y Rehabilitamiento Sísmico

Los productos FRP fueron primero usados para reforzar las estructuras de concreto en la década de los 50's. Durante las siguientes dos décadas, la calidad de los materiales FRP fue aumentada considerablemente, los métodos de fabricación se volvieron automatizados y los costos de los materiales disminuyeron. El uso de estos materiales para el reforzamiento externo de estructuras de puentes de concreto empezó en los 80's, primero como un sustituto de las placas de acero adheridas y después como sustituto de los chalecos de acero para confinamiento en las columnas de los mismos puentes.

La tecnología para el rehabilitamiento externo fue desarrollada principalmente en Japón (Envolturas de lámina – sheet wrapping) y Europa (laminas adheridas – laminate bonding). Hoy en día, existen más de 1000 puentes con vigas de acero y losas de concreto en Japón que han sido reforzadas con la adhesión de placas a las losas. Además, miles de columnas en puentes han sido mejoradas sísmicamente con los mismos materiales. El desarrollo acelerado de las técnicas de producción con costos efectivos para los compuestos FRP ha llegado a tal nivel que están listos para la industria de la construcción. La reducción del costo del material, se acopla perfectamente con su bajo peso y simple instalación, relativamente hay disponibles longitudes ilimitadas y la inmunidad a la corrosión hacen a los materiales FRP una solución atractiva para el post reforzamiento, reparación y rehabilitamiento sísmico.

Los principios detrás de las placas FRP adheridas externamente o "camisas" para las estructuras de concreto son muy similares a los principios usados en las placas de acero adheridas. En general, los miembros a flexión, cortante o carga axial son aumentados o mejorados por la aplicación externa de materiales de refuerzo de alta tensión.

Las razones para aplicar los sistemas FRP como refuerzo externo en estructuras de puentes, pueden ser:

- Renovación de la capacidad, debido a un cambio en el uso de la estructura
- Confinamiento pasivo para aumentar la resistencia sísmica
- Control de grietas
- Reforzar alrededor de nuevas aberturas en losas
- Corrección de una deficiencia en el diseño

### 3.2.1 Campos de Aplicación

Los sistemas con materiales FRP han sido aplicados en muchos elementos estructurales incluyendo vigas, columnas, losas y muros, así como en muchas aplicaciones especiales como en chimeneas, tubos y tanques. Las características son:

1. Añade capacidad a cortante y flexión a vigas de concreto reforzado para reforzar y mejoramiento sísmico.
2. Añade capacidad a flexión a losas de concreto reforzado en las áreas de momentos negativos y positivos
3. Añade flexibilidad y confinamiento a las columnas de concreto reforzado para mejoramiento sísmico y reforzamiento
4. En concreto reforzado, la mampostería ligera reforzada y no reforzada, como la mampostería de unidades de concreto, los sistemas de materiales FRP han demostrado múltiples beneficios al añadir capacidad a flexión y cortante, ductilidad para el mejoramiento sísmico, y en algunos casos resistencia a explosiones para proteger edificios en aplicaciones industriales.

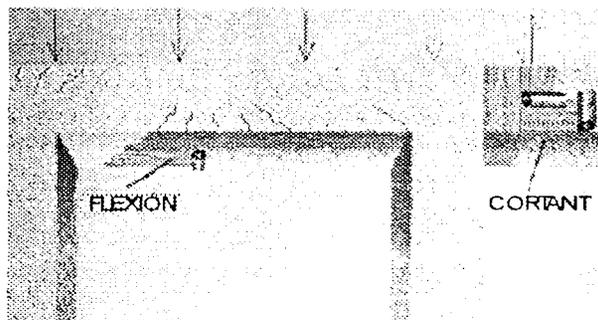


Figura 3.10 Diagrama de Refuerzo a Cortante y Flexión para vigas de Concreto

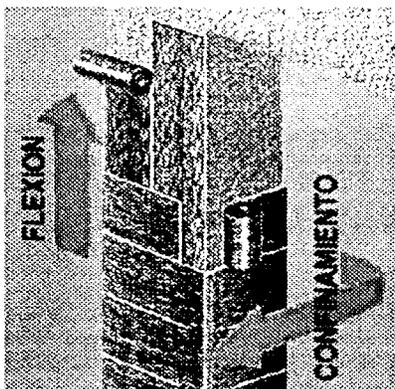


Figura 3.11 Diagrama de Refuerzo a Flexión y Confinamiento para Columnas

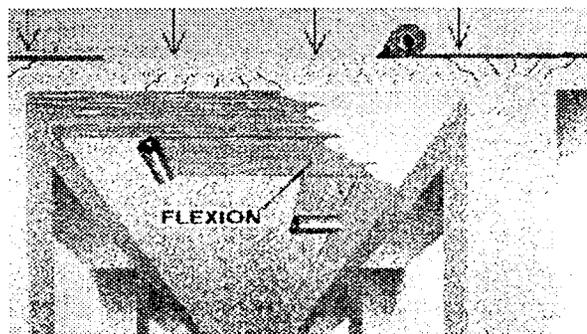


Figura 3.12 Diagrama de Refuerzo a Flexión para Losas y recuperación del Momento Negativo



Figura 3.13 Diagrama de Refuerzo a Cortante y Flexión de Muros

### 3.2.2 Sistemas FRP

Las diferentes formas de los sistemas FRP pueden ser clasificadas en la forma que son entregadas en el sitio e instaladas. Los sistemas de refuerzo externo FRP vienen en una variedad de formas incluyendo 1) Sistemas de capas mojadas, 2) sistemas preimpregnados y 3) sistemas precurados. El sistema FRP y la forma deben ser seleccionados en base a la aceptación de la transferencia de cargas estructurales, capacidad de carga y la facilidad y simplicidad de la instalación. Los sistemas FRP más comúnmente disponibles se mencionan a continuación:

#### 3.2.2.1 Sistemas de Capas Mojadas (Wet Layup Systems)

Los sistemas FRP de capas mojadas consisten en hojas o tapetes de fibras secas unidireccionales o multidireccionales, así como tejidos que son impregnados en sitio con la resina. La resina saturante es usada para unir o adherir las hojas con la superficie del concreto. Los sistemas de capas mojadas son saturados con resina y curados en el lugar de la colocación y en este sentido son análogos a la fabricación del concreto en sitio. Existen tres tipos comunes de sistemas de capas mojadas, que a continuación se mencionan:

- Hojas de fibra seca unidireccional con la fibra predominante en una dirección plana
- Hojas de fibra seca multidireccional o telas con fibras orientadas en al menos dos direcciones planas
- Hilos de fibras secas que están enrolladas o de otra manera aplicadas mecánicamente a la superficie del concreto. Los hilos de fibra seca son impregnados con resina durante la operación de enrollado.

### 3.2.2.2 Sistemas Preimpregnados (Prepreg Systems)

Los sistemas preimpregnados FRP consisten en tejidos u hojas de fibras unidireccionales o multidireccionales que son preimpregnados con una resina saturante. Los sistemas prepreg son adheridos a la superficie del concreto con o sin aplicación de resina adicional, dependiendo de los requerimientos del sistema. Los sistemas prepreg son saturados fuera del lugar de trabajo y como el sistema de capas mojadas, son curadas en el sitio. Los Sistemas prepreg usualmente requieren de calor para ser curados. Los tipos de sistema FRP son similares a los sistemas de capas mojadas, por ejemplo, las hojas unidireccionales de fibra, hojas multidireccionales de fibra e hilos de fibra preimpregnados.

### 3.2.2.3 Sistemas Precurados (Precured Systems)

Los sistemas precurados consisten en una gran variedad de formas de compuestos fabricados en un sistema proveedor de resina y enviados al sitio de trabajo. Por lo general, un adhesivo es usado para adherir las formas precuradas a la superficie del concreto. Los tipos más comunes de sistemas de precurado se mencionan a continuación:

- Láminas unidireccionales precuradas en forma de largas tiras o como delgadas cintas enrolladas
- Mallas multidireccionales precuradas en forma de rollo
- Armazones precurados en forma de segmentos cortados, de tal manera que pueden ser abiertos y puestos en columnas u otros elementos. Capas múltiples de armazones pueden ser adheridas al concreto para que cada una contribuya al confinamiento sísmico o reforzamiento.
- Barras precuradas o torones para ser embebidas en el concreto cerca de la superficie (Ver figura 3.14)

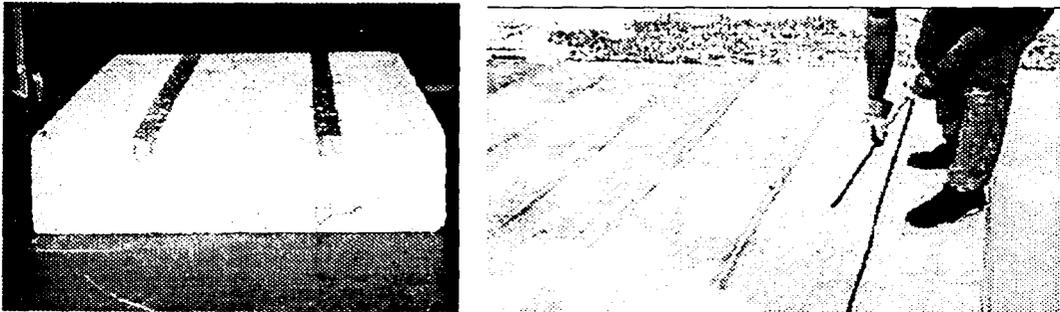


Figura 3.14 Barras FRP embebidas en concreto

Este tipo de colocación de las barras FRP embebidas en el concreto nos ayuda a tener mayor protección contra el fuego, un incremento en la resistencia a la adhesión y es ideal para el refuerzo de concreto en las regiones de momento negativo. Al mismo tiempo, permite al

concreto que los rodea estar lejos de la degradación que generalmente empieza en la superficie exterior permitiendo respirar al concreto.

### 3.2.3 Reparación

El refuerzo FRP puede ser usado también para reparar estructuras de concreto dañadas. Es muy importante reparar el concreto dañado antes de la aplicación de un sistema de compuestos FRP. Los FRP son usados en combinación con la inyección de resina en grietas, morteros cementantes, grouts epóxicos, etc., para reconstruir la sección y recuperar las capacidades de carga dañadas previamente. La reparación de una estructura de concreto con barras de acero corroído puede ser alcanzada reparando o reemplazando los elementos corroídos y atacada la fuente de corrosión. El concreto debe estar libre de astillas y delaminaciones. Se debe consultar al fabricante para una preparación adecuada de la superficie. La reparación de cualquier elemento en una estructura debe ser asegurada a través del análisis específico de cada proyecto. El tipo de compuesto, el número de capas, la orientación de las fibras, los trabajos preliminares y la preparación de la superficie dependen del diseño y el tipo de elemento estructural como fue determinado en el proyecto.



Figura 3.15 Aplicación de la lámina FRP

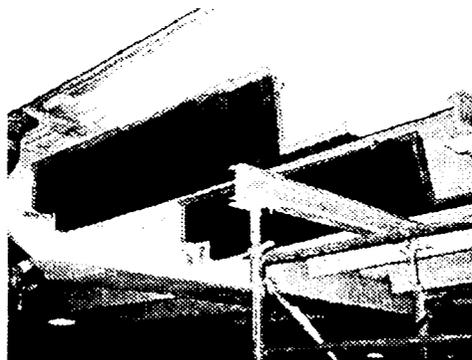


Figura 3.16 Reparación de Vigas a Cortante con FRP

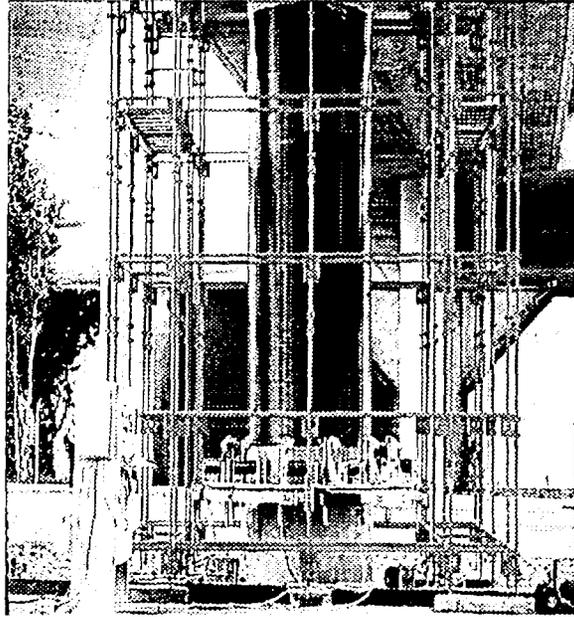


Figura 3.17 Reparación de una columna

### ***3.2.4 Refuerzo***

El refuerzo FRP puede ser usado para reforzar elementos de concreto no dañado que requieren de una capacidad mayor de carga debido a los cambios funcionales, cargas adicionales, cambios en los reglamentos y otras razones. El FRP es colocado en las superficies a tensión de una manera similar a una placa de acero adherida para reforzamiento o embebido dentro de ranuras hechas en la superficie del concreto. El FRP añadirá resistencia a cortante y a flexión a vigas o resolverá los momentos positivos y negativos en vigas y losas. El reforzamiento de miembros de estructuras existentes a través del uso de compuestos es alcanzado por medio de la resistencia a tensión y la rigidez de los compuestos y la compatibilidad de deformaciones del compuesto con el miembro existente. Como en la reparación, el tipo de compuesto, el número de capas, la orientación de las fibras y los trabajos preliminares así como la preparación de la superficie dependen del diseño y tipo de elemento estructural como está determinado en el proyecto.



Figura 3.18 Encamisado con FRP de una columna

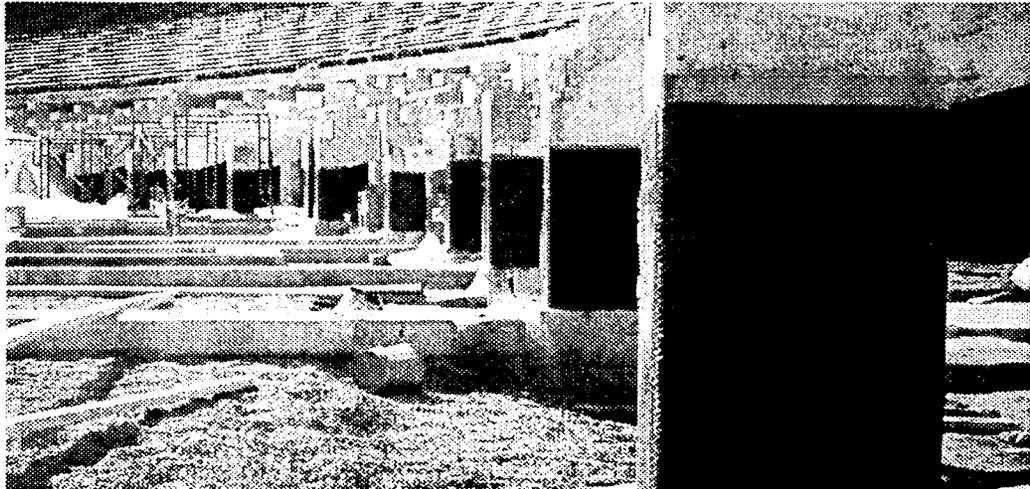


Figura 3.19 Reforzamiento con FRP de las columnas de un estadio

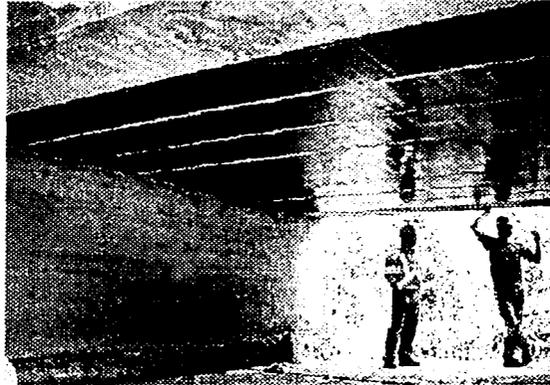


Figura 3.20 Reforzamiento de un puente con FRP

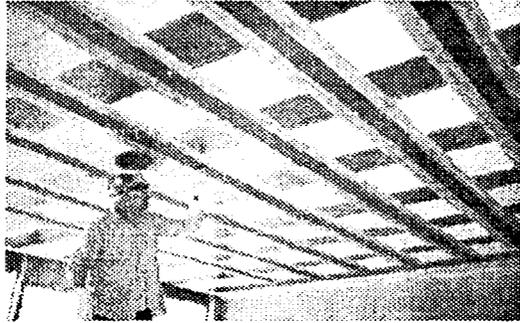


Figura 3.21 Reforzamiento de una losa con tiras FRP

### ***3.2.5 Rehabilitación Sísmica***

El refuerzo FRP ha sido usado extensivamente para la contención de columnas de concreto y muros sujetos a la acción sísmica. Un gran número de sistemas FRP han sido calificados para su uso, según Caltrans, para enchalecar o encamisar columnas de puentes tanto circulares como rectangulares. El mejoramiento en los factores de ductilidad de arriba de 10 veces han sido realizados a través de encamisar columnas con FRP. Los sistemas FRP específicos pueden dar los requerimientos sísmicos de acuerdo a sus capacidades de carga y consideraciones geométricas.

Además, los sistemas FRP pueden ser usados para estabilizar aberturas en muros de ladrillo y otro tipo de muros de mampostería ligera no reforzados, donde en aplicaciones de seguridad se requiere de salidas de emergencia y rutas de salida en edificios.



Figura 3.22 Rehabilitamiento Sísmico de las columnas de un puente vehicular.

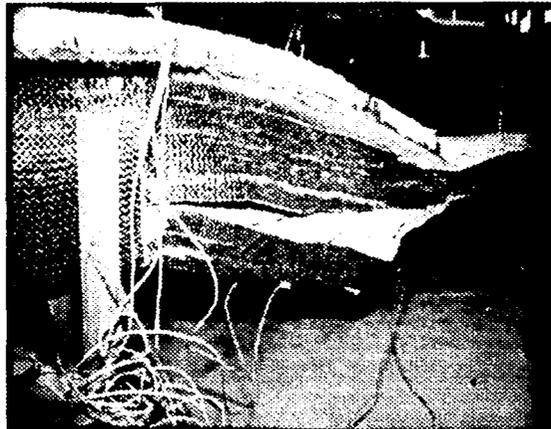


Figura 3.23 Falla de una viga reforzada con FRP

### *3.2.6 Elementos Circulares*

También los compuestos FRP son utilizados para la rehabilitación de estructuras circulares como chimeneas, silos, grandes tubos para abastecimiento de agua potable y alcantarillado. Cuando el sistema FRP se aplica a chimeneas, se cubren los requisitos de refuerzo requeridos por la deflexión excesiva debido a cargas de viento y esfuerzos de confinamiento

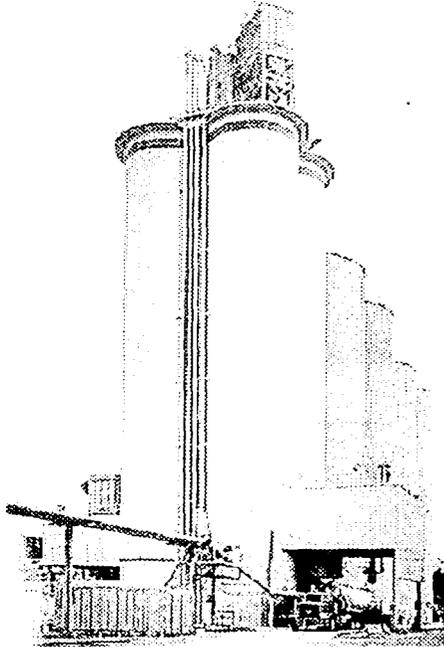


Figura 3.24 Silo reforzado con FRP

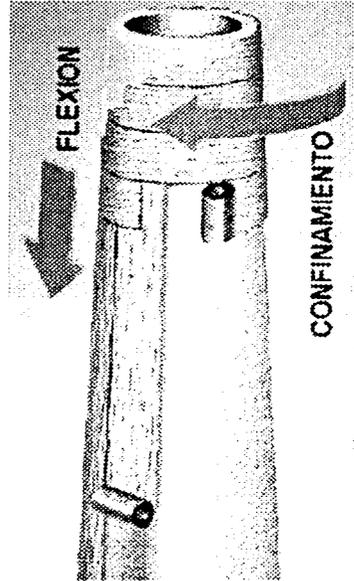


Figura 3.25 Reforzamiento a Flexión y Confinamiento de una chimenea

Para reforzar silos y tanques con los sistemas FRP, se cumple con los requerimientos para evitar esfuerzo perimetral excesivo y evitar la propagación de grietas en estructuras hidráulicas. Cuando los sistemas FRP se aplican a tuberías o túneles, se satisfacen las necesidades de refuerzo para cargas laterales y de flexión así como los esfuerzos en el perímetro.

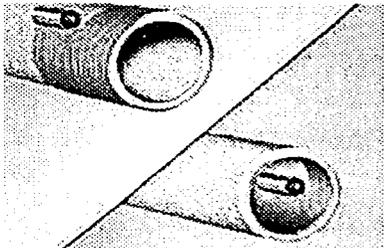


Figura 3.26 Reforzamiento de tuberías

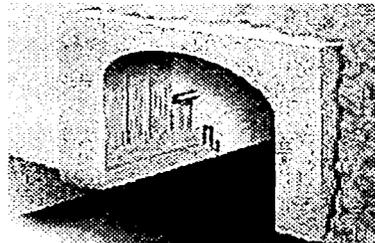


Figura 3.27 Reforzamiento de túneles

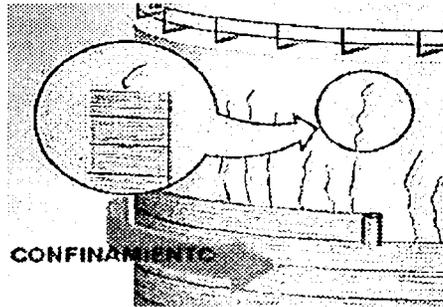


Figura 3.28 Reforzamiento de tanques para líquidos

Es importante mencionar que no solo se puede reforzar o rehabilitar concreto, también materiales como el acero, madera y mampostería.

### 3.3 Concreto reforzado – Barras FRP

El concreto reforzado es un material muy común para la construcción de estructuras. Mientras el concreto tiene una gran resistencia a la compresión, tiene una muy limitada capacidad a la tensión. Para superar estas limitaciones de tensión, las barras de refuerzo son usadas en el lado a tensión en las estructuras de concreto donde son protegidas adecuadamente del ataque del ión cloruro, el acero de refuerzo puede en las últimas décadas no exhibir ningún signo visible de deterioro. De cualquier forma, esto no siempre es posible dar este tipo de protección contra la corrosión. El recubrimiento de concreto insuficiente, diseño o mano de obra pobre y presencia de grandes cantidades de agentes agresivos, los cuales pueden llevar al agrietamiento del concreto y la corrosión de las barras de acero.

Los compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP) hechos de fibras de vidrio o carbono impregnadas con resina, tienen un gran potencial de llenar este vacío en el costo/comportamiento. Los compuestos FRP pueden ser usados como refuerzo no preesforzado en miembros sujetos a flexión, cortante y compresión. Además de ser totalmente resistentes al ataque del ion cloro, ofrecen una resistencia a tensión de 1 ½ a 4 veces más que el acero (dependiendo de la fibra de refuerzo, vidrio o carbono) y con solamente el 25% del peso.

#### 3.3.1 Beneficios de las Barras

- Alta relación Resistencia entre Peso – nos da un refuerzo bueno en aplicaciones sensibles al peso
- No Corrosivo – no se corroerá bajo la exposición a una gran variedad de elementos corrosivos incluyendo los iones cloro

- No Conductivo – nos da un excelente aislamiento tanto eléctrico como térmico
- Excelente Resistencia a la Fatiga – que se adapta muy bien a las situaciones de cargas cíclicas
- Buena resistencia al impacto – que resiste la rápida y severa carga en un punto
- Transparencia Magnética – que no es afectada por los campos electromagnéticos. Excelente para el uso en cuartos MRI (Inducción de Resonancia Magnética) y otros tipos de instalaciones de pruebas electrónicas
- Ligero –fácilmente transportado y ensamblado en el campo sin necesidad de equipo pesado

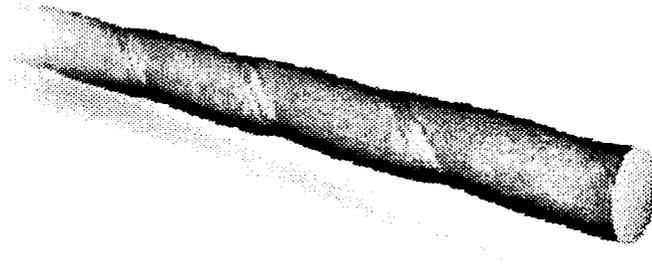


Figura 3.29 Barra FRP

### ***3.3.2 Áreas de Aplicación***

Existen cuatro categorías generales para la aplicación del refuerzo FRP que han sido identificadas como viables para sustituir al acero, acero con capas de epóxico y barras de acero inoxidable

#### **3.3.2.1 Concreto Reforzado expuesto a sales de deshielo**

Las barras FRP pueden eliminar los problemas de corrosión y reducir el mantenimiento, además de los costos de reparación en climas nórdicos donde las sales del deshielo son usadas cada año en caminos y pavimentos. Las aplicaciones que más beneficios tienen, podemos mencionar a estructuras de estacionamientos, plataformas de puentes, muros de contención, parapetos, barandales y cimentaciones; carreteras, losas sobre el piso y muchas otras.

#### **3.3.2.2 Construcción de estructuras en o cerca del océano**

La corrosión del acero de refuerzo es un problema común en estructuras construidas cerca o dentro del océano. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son: muros de contención, puertos, pilotes, plataformas, estructuras flotantes, canales, muelles, escolleras, cajones submarinos, caminos y edificios, plataformas marinas, piscinas y acuarios.

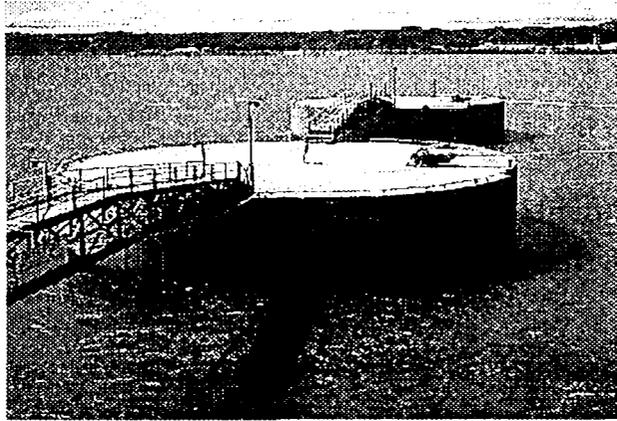


Figura 3.30 Instalaciones de puertos y diques

### 3.3.2.3 Aplicaciones sujetas a otros agentes corrosivos

Las industrias de procesos químicos en todos sus tipos, así como agua residual de origen doméstico o industrial, constituyen la mayor fuente de corrosión para el acero de refuerzo. Las aplicaciones más típicas incluyen: plantas de tratamiento de aguas residuales, plantas petroquímicas, molinos de pulpa y papel, plantas de gas líquido, tanques y tuberías de combustible, torres de enfriamiento, chimeneas, varios tipos de operaciones de minas, plantas nucleares generadoras e instalaciones o descargas nucleares.

### 3.3.2.4 Aplicaciones que requieren baja conductividad eléctrica o neutralizar la actividad electromagnética

Cuando el uso de las barras de acero en aplicaciones donde es necesario una baja conductividad eléctrica o neutralizar la actividad electromagnética, frecuentemente resulta en un proceso complicado de colocación de capas, si es posible el uso de FRP. Algunas aplicaciones potenciales son: plantas fundidoras de aluminio y cobre, registros para equipos eléctricos, teléfono y comunicaciones, estructuras soportando equipo electrónico como las torres de transmisión para las telecomunicaciones, torres de control en aeropuertos, equipos de imágenes de resonancia magnética en hospitales, cruces de ferrocarril, concreto cerca de cables y subestaciones de alto voltaje y las estructuras militares que necesitan invisibilidad al radar.

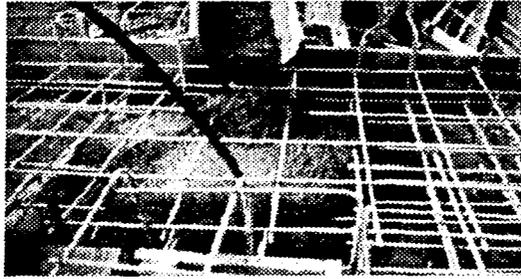


Figura 3.31 Hospital Notre – Dame donde usaron barras para neutralizar el magnetismo en un cuarto MRI

Otra aplicación que se encuentra revolucionando el uso de las barras FRP es la construcción de losas para plataformas de puentes de todo tipo.

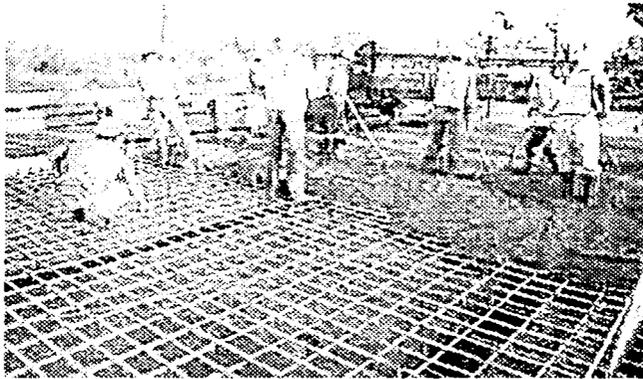


Figura 3.32 Construcción de la losa de un puente con barras FRP

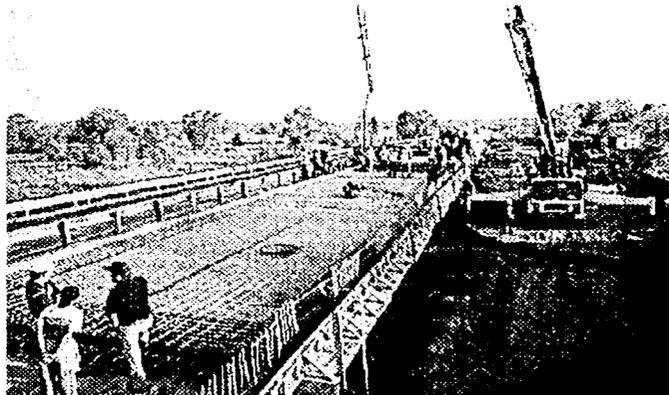


Figura 3.33 Puente Sierrita de la Cruz, Texas, EUA

Además pueden ser utilizadas en aplicaciones arquitectónicas como elementos prefabricados o revestimientos.



Figura 3.34 Elementos arquitectónicos prefabricados con barras FRP

### 3.3.3 Especificaciones y Códigos

Los refuerzos de compuestos FRP tienen ventajas deseables en su composición muy por arriba de otros productos de refuerzo para el concreto. De cualquier forma, desde que las propiedades de los productos de refuerzo son diferentes que las del acero de refuerzo, el diseño del concreto reforzado con productos FRP tendrá que ser diferente en muchos casos. Los ingenieros estructurales deben considerar la conveniencia de reforzar el concreto con barras FRP, dejando en mente los siguientes puntos en sus diseños:

- La sustitución directa de barras FRP en un elemento de concreto diseñado con barras de acero, no es posible en la mayoría de los casos.
- El bajo módulo de elasticidad de las barras de compuesto limita las aplicaciones en claros cortos de elementos estructurales secundarios.
- Las barras de FRPV están limitadas a un esfuerzo máximo de 20% de la resistencia a tensión de diseño garantizada.
- Las aplicaciones de las barras FRVP son limitadas para el refuerzo de concreto y no son usadas como elementos presforzados o postensados.

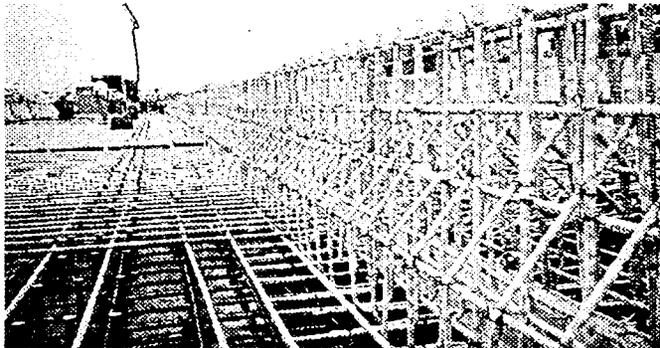


Figura 3.35 La instalación de barras FRP es similar al de los materiales convencionales

El propósito del documento emitido por el Comité ACI 440 H es dar recomendaciones en la ingeniería y aspectos constructivos para concreto reforzado con FRP. El documento solo incluye refuerzo FRP no pretensado. El contenido de la guía está basado en investigación experimental, trabajo analítico y aplicaciones en campo del refuerzo FRP. Mientras el ACI completa un código, los diseñadores recomiendan ponerse en contacto con los fabricantes de las barras FRP para información de diseño de sus respectivos productos. En la Figura 3.36 se muestran los códigos existentes de los países que tiene más desarrollada la tecnología de barras FRP.

Figura 3.36 Cuadro de Guías y Códigos para Barras FRP

|        |                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| EUA    | Instituto Americano del Concreto, Reporte Comité 440 H Guía para el Diseño y Construcción de Concreto Reforzado con Barras FRP (1990)                                                                                              |
| Canadá | Código Canadiense de Diseño de Puentes, Capítulos 1 y 2, Sección 16, Estructuras Reforzadas con Fibra (1998)<br>Standards CSA 2806 Diseño y Construcción de Componentes de Edificios con FRP (1999)                                |
| Japón  | Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles, Recomendaciones para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto usando materiales reforzados con fibras continuas (1992)                                                         |
| Europa | Federación Internacional de Concreto Estructural (FIE) Grupo de Trabajo 2.3 Refuerzo FRP para Estructuras de Concreto (1999)<br>Norma: Modificación Estructura a BS 6733 Cuando Usamos Refuerzo FRP Reporte # SF 22 A 28741 (1998) |

Como se ha comentado en capítulos anteriores, las barras FRP son un compuesto termofijo, y no pueden ser doblados después de la polimerización o curado. Estos dobleces pueden ser hechos durante el proceso de fabricación.

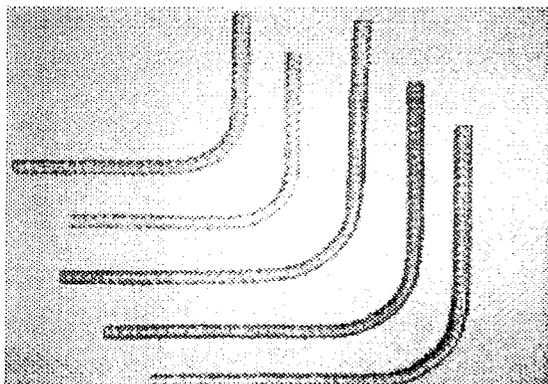


Figura 3.37 Perfiles FRP con doblez

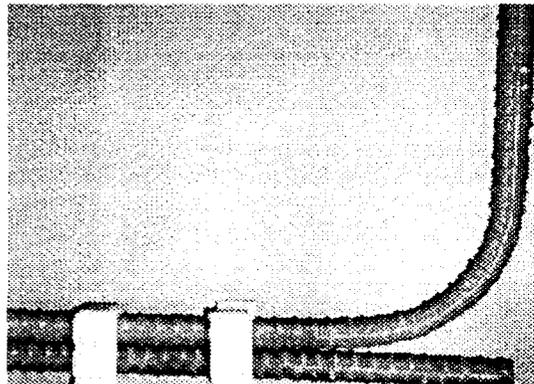


Figura 3.38 Empalme de las Barras FRP

Así mismo, para desarrollar los empalmes de las barras FRP se necesita una longitud de 40 veces su diámetro, que es el único método que está aceptado hasta ahora, aunque las uniones se pueden desarrollar también con resinas.

Existen barras huecas que son utilizadas cuando se requiere de una instrumentación o inspección para una aplicación de "estructura inteligente".

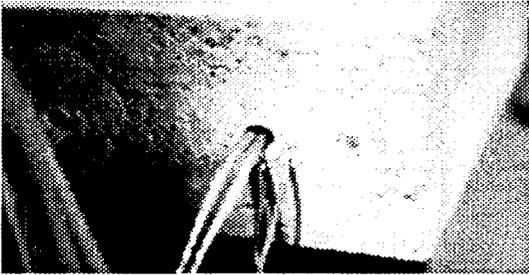


Figura 3.39 Barra Hueca instalada en una viga de concreto

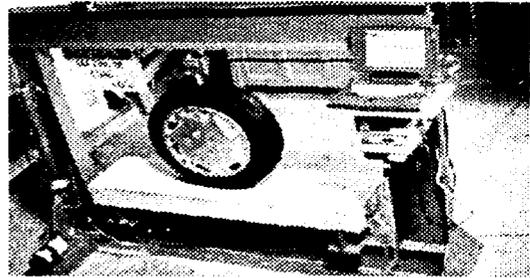


Figura 3.40 Estructura Inteligente bajo prueba con instrumentación

También se pueden instalar sensores en para poder llevar un control del comportamiento de las estructuras de concreto reforzado.

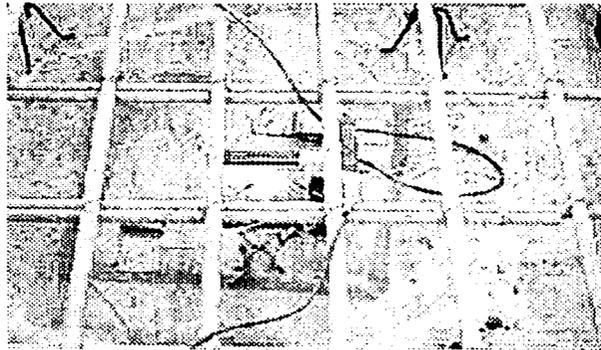


Figura 3.41 Sensores instalados en las barras FRP

Para el concreto reforzado, en Japón se han utilizado en vigas de cimientos las **barras FRP** en edificios de 3 hasta 23 pisos.

### 3.4 Aplicaciones marítimas y de costa afuera

#### 3.4.1 Pilotaje Marítimo

El pilotaje con compuestos FRP fue desarrollado a principios de los 90's como parte de la solución a muelles deteriorados y estructuras con frente de agua sujetas al agresivo ambiente marino. Los compuestos FRP representan una alternativa de material de construcción sin muchas de las desventajas de comportamiento de los materiales convencionales tales como putrefacción, enmohecimiento, lajarse y la oxidación. El crecimiento de las perforaciones marinas, las estrictas leyes ambientales que limitan el uso de los tratamientos tóxicos para la madera, y las prohibiciones a las prácticas tradicionales de mantenimiento (primers, sandblasteo y pinturas a base de solventes) han resultado en costos elevados de mantenimiento y reemplazo de materiales convencionales. Los materiales compuestos ofrecen soluciones de largo plazo y bajo mantenimiento. El uso de pilas y pilotes con compuestos FRP en un ambiente agresivo en ciertas condiciones ha mostrado ser más económico que la madera cuando se consideran los costos del ciclo de vida.

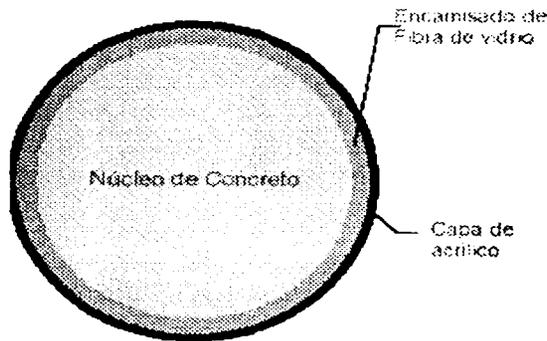


Figura 3.42 Sección Transversal de una Pila marítima FRP

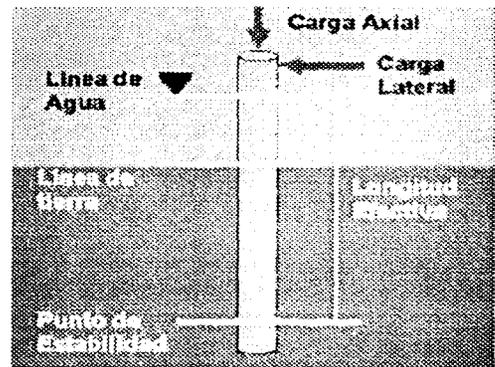


Figura 3.43 Configuración de la pila "Delfin"<sup>1</sup>

La industria privada junto con el gobierno han desarrollado programas de investigación que han sido enfocados a la selección y optimización de los materiales y las pruebas de los productos para cumplir con el perfil necesario de las instalaciones con frente de agua. El Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos y el Centro de Servicio en Ingeniería para Instalaciones Navales junto con la industria de los compuestos, han conducido los programas de desarrollo para evaluar los productos que pueden ser rehabilitados y reemplazados por nuevos productos que son usados en las estructuras con frentes de agua. Los productos evaluados en estos programas incluyen tanto el pilotaje con compuestos FRP como el refuerzo FRP en pilas de concreto.

<sup>1</sup> Producto fabricado por Hardcore Composites

En los últimos diez años, los compuestos han sido usados para muros de contención en playas, carreteras, muelles, puertos, lagos, desarrollos residenciales, ríos y arroyos. Los productos compuestos han sido instalados como defensa y pilas estructurales para muelles, puertos y plataformas.

Los tipos de productos para pilotaje con compuestos disponibles son:

- Pilas de defensa
- Pilotes en hojas
- Pilotes de fricción

### 3.4.2 Otros

Principalmente existen aplicaciones en costa afuera como piezas para plataformas marinas, ductos submarinos, tubos de dragado, cables.

Principales aplicaciones

- Defensa
- Soportes estructurales para las plataformas de los muelles
- Ayudas a la navegación
- Estabilización de la línea costera
- Sistemas de protección para puentes en muelle

Además de la ingeniería de puentes, existe el uso de las pilas con compuestos FRP para la protección de puentes en muelle. Esta aplicación tiene ventajas de las propiedades para las pilas de defensa individuales y los organiza en grupos para proteger las pilas de los puentes del daño de colisión de buques marítimos o escombros producidos por las tormentas más violentas.

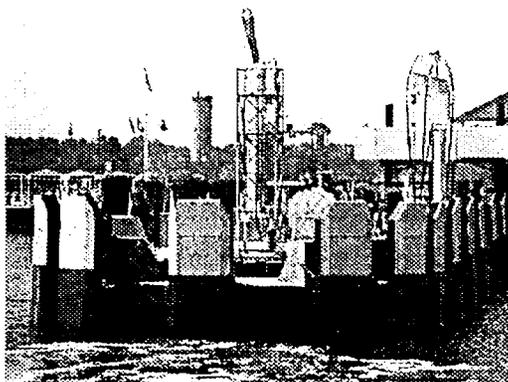


Figura 3.44 Muelle disipador de energía

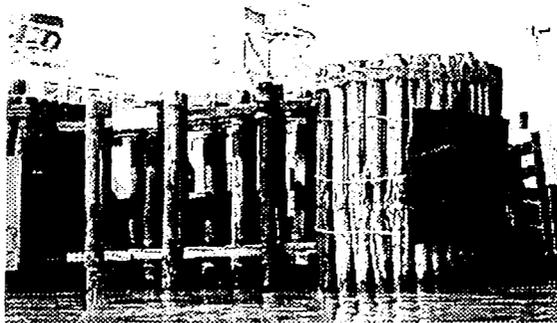


Figura 3.45 Muelle construido con pilas FRP

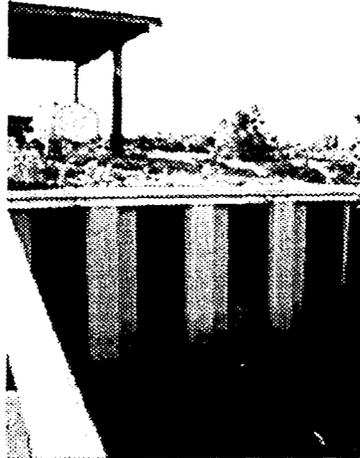


Figura 3.46 Muros de Agua

### 3.5 Elementos Presforzados

Generalmente el concreto ha sido presforzado que incluye pretensado y postensado con cables de acero de alta resistencia ayudándolo a resistir el esfuerzo a tensión, reducir el agrietamiento y las deflexiones. De cualquier forma, los compuestos FRP tienen muchas características que lo hacen el mejor candidato para los tendones en estructuras de concreto reforzado comparadas con acero, incluyendo la alta resistencia a tensión, flexibilidad con la ventaja de tamaño y forma, ligero y resistencia a la corrosión. Especialmente desde que los compuestos FRP no sufren ningún daño de la exposición a factores ambientales, el postensado puede ser simplificado grandemente permitiendo que los cables estén fuera de la estructura. Con este cambio, el concreto no tendrá agujeros para el post tensado y lo que lleva a reducir el tiempo de fabricación del concreto y el proceso de instalación de los cables es mucho más

fácil. Una característica que puede minimizar las ventajas de los tendones es que no son totalmente comprendidos, pero se puede utilizar un bajo módulo de elasticidad, fluencia y fatiga. Si los compuestos FRP se empiezan a utilizar en mayor medida, estos temas deberán ser atendidos y resueltos.

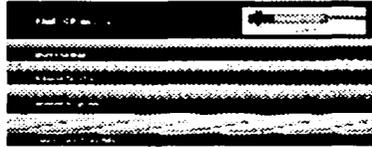


Figura 3.47 Elementos de presfuerzo

El presfuerzo y postensado de las estructuras de concreto es hoy en día uno de las aplicaciones de FRP mayor usada. Como ejemplo, podemos mencionar un puente carretero en Calgary, Canadá. Se utilizaron FRP Carbono para presforzar los dos claros y las secciones T. Este puente fue abierto al tráfico en 1993 y sigue con un continuo monitoreo de la integridad de la estructura. Otro ejemplo del uso de FRP para presforzados es un atracadero de concreto construido por Sumitomo Construction Co. Ltd., en Japón. Cables FRP fueron usados para presforzar vigas simplemente apoyadas usadas en una barcaza. Como ejemplo del postensado tenemos un puente en Marienfelde, Berlin, que utiliza FRP Vidrio como postensado exterior de la estructura como se muestra en la figura 3.48.

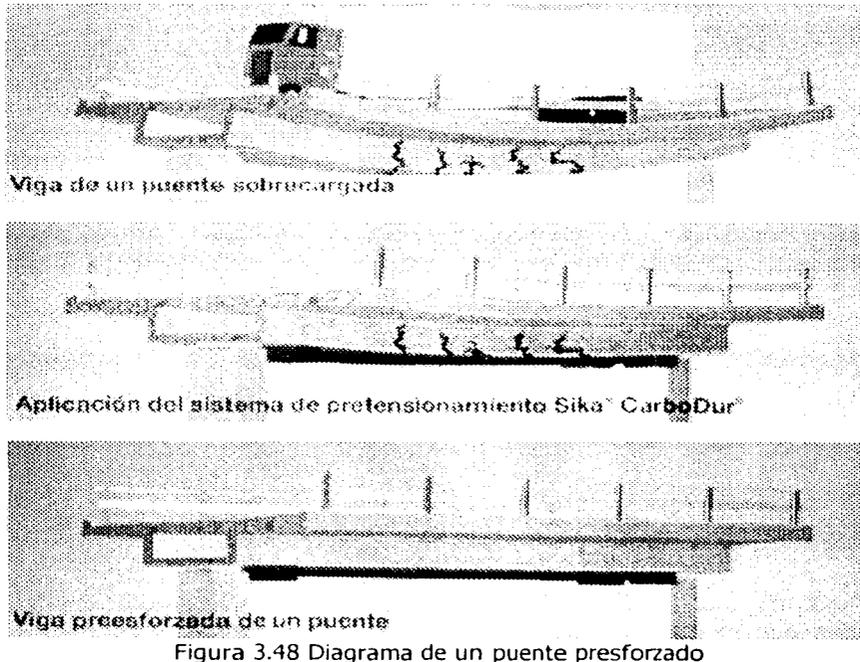


Figura 3.48 Diagrama de un puente presforzado

### 3.6 Barras de unión para pavimentos (Dowel Bar)

En los últimos 35 años, las barras de soporte para unir pavimentos rígidos han sido ampliamente usados en Estados Unidos, esto se debe a que los extremos de las losas de los pavimentos están sujetas al drenaje del agua que contiene metales y sales que se encuentran en la carretera.

Las barras de unión de FRPV tienen numerosas ventajas cuando se usan como elementos para transferir carga y extender la vida del pavimento. La falla de la junta es frecuentemente resultado de la corrosión de las uniones de acero. Estas juntas de FRVP no se corroen u oxidan, manteniendo el concreto junto o causando descascaramiento en el concreto de alrededor. Además, mientras se provee la capacidad a cortante necesaria en la junta, la baja rigidez de las barras de unión FRPV reducen los esfuerzos de fatiga en el concreto que está cerca de la unión.

En 1983, el Departamento de Transportes de Ohio instaló barras de unión alternativas para una gran durabilidad en una carretera de Estados Unidos. Estas barras de unión fueron hechas con materiales FRPV. En 1998, la Market Development Alliance (MDA) extrajo y probó ejemplares de estas barras de unión para determinar su comportamiento de durabilidad después de 15 años de servicio en el pavimento.

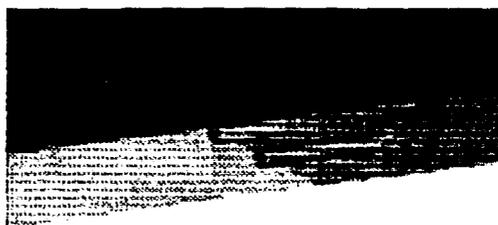
Los resultados mostraron que las barras de unión FRPV no fueron afectadas por 15 años de servicio en campo y a la exposición.

Además, Hughes Brothers incorporó las barras de unión Aslan en un proyecto de investigación de pavimentos de alta resistencia en 1997. Las juntas transversales fueron puestas en intervalos de 6 metros. La longitud en las secciones de pavimentos donde se incorporaron las barras de unión FRPV fue de 135 metros y 127 metros con un espaciamiento de 6 metros. Hasta ahora, se indica que se comportan bien.

Actualmente estas barras de unión FRP han sido instaladas como una alternativa en proyectos de algunos estados de EUA y Canadá como: Illinois, Iowa, Kansas, Minnesota, Ohio, Wisconsin y Manitoba.



**Figura 3.49 Sin barras de unión no existe la transferencia de carga**



**Figura 3.50 Pavimento con barras de unión FRPV**

Existen tres elementos para el diseño de las barras de unión, y son el espaciamiento, la longitud y el diámetro. Debido a la flexibilidad de la sub base, la carga no se transfiere por una simple barra, sino por un grupo de barras de unión. La Universidad de Manitoba mostró que la efectividad de la unión o junta FRP está en el rango del 86% al 100%, usando una sub base débil y del 90% al 97% usando una sub base rígida.

La investigación concluye " las barras de unión FRPV son viables, una alternativa libre de corrosión, comparada con las barras de unión de acero"<sup>2</sup>.

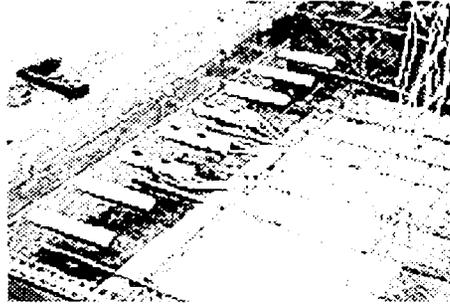


Figura 3.51 Barras de Unión FRP

Existen presentaciones de las barras de unión FRP que aseguran el espaciamiento, se muestran a continuación:



Figura 3.52 Tipos de presentación de las barras de unión FRP para pavimentos

<sup>2</sup> ACI Structural Journal, vol 98 No 2, marzo – abril 2001

## 3. 7 Aplicaciones Arquitectónicas

### 3.7.1 Componentes de Instalaciones

Existen componentes de compuestos FRP para instalaciones de fontanería o sanitarias que dan una gran resistencia, además de ligereza. A diferencia de la porcelana o el acero, la superficie de los compuestos FRP es cálida al tacto. El moldeo de los compuestos permite más formas estéticas y acabados más funcionales.

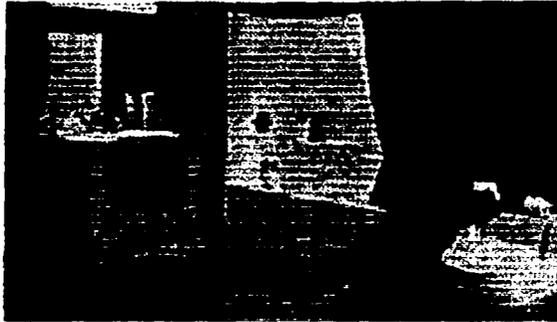


Figura 3.53 Componentes FRP para instalaciones

### 3.7.2 Pisos de azulejos

Existen pisos de teja o azulejo que pueden ser fabricados con compuestos FRP. Los constructores lo usan para cubrir grandes áreas de piso en oficinas electrónica y de diseño modular. Además existen pisos de vinilo y existe una gran variedad de diseños y colores, son de bajo mantenimiento, higiénicos y repelentes.

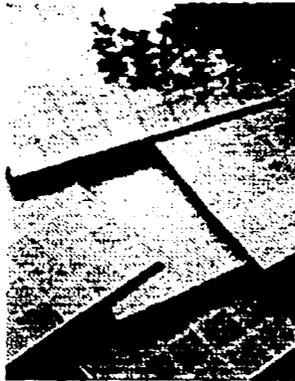


Figura 3.54 Pisos FRP

### 3.7.3 Falsos Plafones

Los paneles suspendidos ó más comúnmente llamados falsos plafones, hechos con compuestos FRP incrementan la rigidez y la resistencia, además permite el fácil ensamblado. Estos sirven para las aplicaciones convencionales de cubrir las instalaciones eléctricas, ductos, tuberías, etc. Muchos de estos plafones mejoran la calidad acústica de los sitios de trabajo.



Figura 3.55 Plafones FRP

### 3.7.4 Techos

Existen también techos artificiales listos para cubrir las losas de concreto. Los productos para estos techos reforzados con FRP mantienen su forma durante el envío y el manejo. Una vez instalados los techos dan una mayor resistencia y estabilidad dimensional por arriba de las temperaturas promedio sin absorber humedad como los techos convencionales lo hacen.



Figura 3.56 Techos FRP

## 3.8 Otras Aplicaciones

### 3.8.1 Torres de transmisión

Sistemas para estructuras de gran peso fueron desarrollados por Ebert Composite Corp., los cuales utilizan un diseño de construcción instantánea que simplifica la velocidad de ensamblado. No se necesitan adhesivos o uniones convencionales para la estructura principal.

Hasta ahora, este sistema se ha utilizado en la construcción de tres torres de transmisión a escala real, en una línea cerca de Los Angeles. Debido a las propiedades únicas de los compuestos FRP, la torre permite utilidades eléctricas más eficientes, esto es debido a las excelentes propiedades de aislamiento eléctrico que permite transmitir y distribuir más energía en un espacio dado.

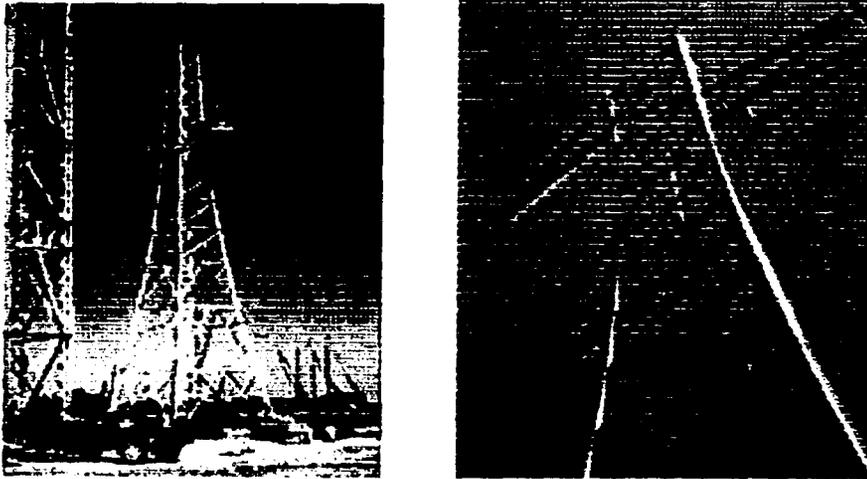


Figura 3.57 Torres de Transmisión de FRP

Los resultados son los bajos costos de construcción y mantenimiento, impacto ambiental mínimo y pequeños campos electromagnéticos. Este tipo de estructuras o sistemas pueden ser potencialmente usados en aplicaciones estructurales como puentes donde se necesite gran resistencia, poco peso, resistencia a la corrosión.

### 3.8.2 Productos para plantas de tratamiento

En estos tiempos, las empresas y aún los municipios y ciudades en donde vivimos, se encuentran enfrentados a encontrar nuevas formas de aprovechar los recursos, lo cual nos lleva al reciclaje. En este caso los compuestos FRP son una solución versátil, fuerte y durable. Las canaletas de compuestos FRP son producidas por Composite Structures, Inc.

Las canaletas son usadas en plantas de tratamiento de aguas industriales y municipales para medir matemáticamente el flujo que entra y sale de las instalaciones de las plantas. El concreto, acero y aluminio se usaban hasta mediados de los 60's. Además cuenta con todas las características que he venido mencionando anteriormente, como estabilidad dimensional y resistencia a la abrasión, entre otras. Existen aproximadamente cinco tipos de canaletas en 90 tamaños. Los dos más usados son el Parshall y el Palmer-Bowlus (PB).

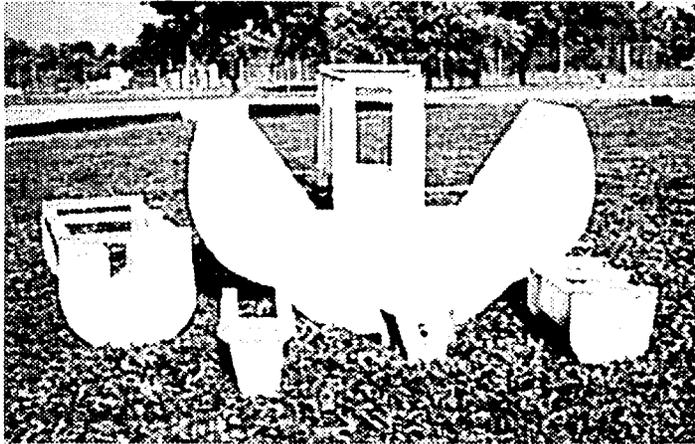


Figura 3.58 Canaletas

### 3.8.3 Productos para infraestructura ferroviaria

Los sistemas de transporte colectivo como el METRO o el Regie Autonome des Transports Parisiens (RATP) de Paris se apoyan en barras guías que son usadas para ayudar al tren a frenar cuando va llegando a cualquier estación, las cuáles son hechas de acero. Por el constante uso y desgaste, el acero requiere de continuo mantenimiento, algunas veces interrumpiendo el servicio. Los largos trabajos de mantenimiento, crean trastornos en la vida cotidiana de la comunidad. El RATP comenzó un proyecto de remodelación, el cual incluye la construcción de nuevas líneas y resolver los problemas de las ya existentes.

Doneco Celite Profilex (DCP) propuso el uso de compuestos pultruidos para hacer las barras de guía de la línea Meteor de París. Teniendo resultados de algunos ejemplares de prueba en ciertas estaciones es refuerzo FRP es ahora considerado como altamente calificado y es el único material usado para las barras de guía en las líneas de metro de París.

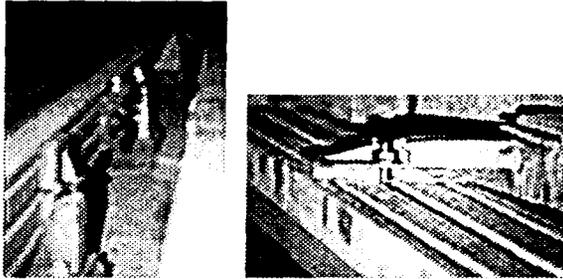


Figura 3.59 Equipo en rieles FRP para trenes

Estas barras de guía necesitan menor mantenimiento que las barras de acero, dando una solución efectiva al costo. El acero tradicional requiere de limpieza de por lo menos una hora cada día debido a la oxidación del metal. Esta limpieza es hecha sólo cuando cortan la energía, lo cual limita el tiempo de trabajo. Las barras FRP no requieren de este mantenimiento lo cual se traduce a ahorros de tiempo y dinero para la RATP.

Este tipo de perfil ha demostrado grandes capacidades mecánicas, fácilmente resisten la presión que genera el frenado del tren, además tiene resistencia al fuego y al humo; tiene propiedades dieléctricas lo cual significa seguridad en el sistema.

#### 3.8.4 Cercas de Protección

También se han desarrollado cercas de protección para proyectos que requieren soluciones innovadoras, tal es el caso del Aeropuerto Nacional de Bruselas en Bélgica, quienes requerían un sistema de cercas durable, bajo costo y transparente al radar y que además cumpliera con los criterios de seguridad. Con elementos pultruidos se sustituyeron más de 5.5 kilómetros de cercas, y como he mencionado anteriormente las ventajas de la cerca con compuestos FRP son:

- Durabilidad – no se pudre, no se oxida y no necesita pintarse de nuevo
- Integridad estructural – la construcción del compuesto puede soportar los fuertes vientos y los impactos de onda de los jets, y
- Ligera y fácil de instalar

Hasta ahora este sistema también ha sido introducido en aeropuertos de Barcelona y Bilbao, entre otros aeropuertos europeos, y se espera que el mercado de las cercas siga creciendo.

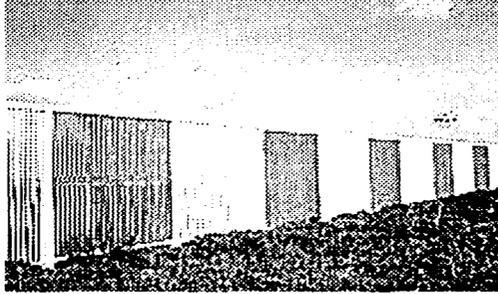


Figura 3. 60 Cercas de FRP

## DURABILIDAD

En la mayoría de los casos, los productos de compuestos FRP, específicamente los usados en la industria de la construcción, se enfrentan a productos establecidos realmente competitivos (fabricados con materiales de construcción tradicionales), los cuales tienen una economía conocida, estándares establecidos, y sobre toda la experiencia e historia que tienen en la industria. Para que los compuestos FRP puedan competir apropiadamente, estos productos FRP deben crear nuevas definiciones en comportamiento y economía.

Harold Boeschstein, un pionero de la industria de los compuestos dice: " También nuestro material (Compuestos FRP) debe hacer el trabajo que ningún otro material pueda hacer efectivamente o por el mismo precio, éste se debe comportar mejor que los materiales competitivos o a un menor precio deben ser igual de buenos que los materiales alternativos o sus características únicas deben permitir al fabricante usarlos para hacer un corolario de ahorros que no son posibles con otros materiales". Estas palabras fueron dichas hace más de cincuenta años en el momento en que empezaba la tecnología FRP y hasta la fecha sigue siendo usada, especialmente para la aceptación de los compuestos en la infraestructura civil.

Los compuestos FRP han sido usados exitosamente por más de cincuenta años en una gran variedad de aplicaciones que ya hemos mencionado anteriormente. La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) y la Asociación Nacional de Ingenieros de la Corrosion (NACE) han publicado información concerniente al diseño, materiales y fabricación de los compuestos FRP usados en aplicaciones contra la corrosion. La industria de los compuestos ha desarrollado una base de datos comprensiva acerca de la durabilidad de los compuestos, los datos son de materiales y productos usados en la infraestructura civil pública, así como en proyectos relevantes. La integración adecuada del diseño de los materiales y el metodo de fabricación nos ayuda a asegurar la durabilidad bajo condiciones de servicio en ambientes realmente severos. Por lo general, en las aplicaciones que están en contacto directo con el agua, soluciones alcalinas y químicas agresivas se usa una barrera contra la humedad. Es muy común en la práctica poner una capa de resina pura llamada cubierta de gel o una barrera contra la corrosión. Las capas en la superficie contra la humedad son comúnmente usadas en productos que van a estar sujeto a una alta cantidad de humedad como las estructuras costa afuera,

tanques de almacenamiento, tubería de petróleo o aguas residuales, así como instalaciones sanitarias.

Así como los compuestos FRP actualmente son impulsados para aplicaciones en la infraestructura civil pública y que son sistemas prediseñados, es necesario mencionar las principales ventajas de durabilidad de los compuestos FRP para poder asegurar una comunicación efectiva con el fabricante de los productos.

## 4.1 Definición

La durabilidad de un material o una estructura puede ser definida como su habilidad a resistir el agrietamiento, oxidación, degradación química, delaminación, deterioro y/o efectos de objetos extraños dañinos para un periodo específico de tiempo bajo condiciones ambientales específicas. Los compuestos FRP (y sus constituyentes) pueden ser afectados por una variedad de factores que incluyen aquéllos relacionados con la naturaleza y el ambiente que los rodea.

La tolerancia al daño es definida como la habilidad del material o la estructura para resistir la falla y su comportamiento constante como fue diseñado a la presencia de daño por un periodo específico de tiempo bajo ciertas condiciones ambientales. Los compuestos FRP tienen por lo general una buena tolerancia al daño. La siguiente figura ilustra la filosofía de las consideraciones de la tolerancia al daño que se incorporan al proceso de fabricación.

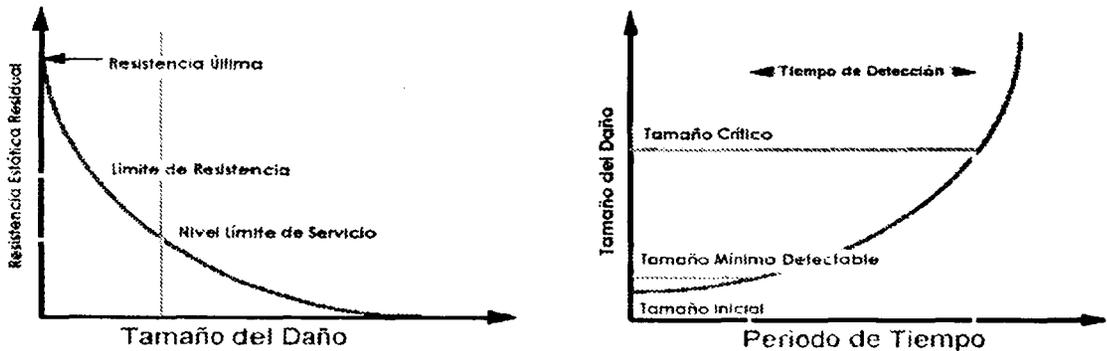


Figura 4.1 Aplicación de una Tolerancia de Daño en la Filosofía de Diseño

Fuente: Product Selection Guide: FRP Composites for Bridge Applications, Market Development Alliance, 2002

---

## 4.2 Materiales constituyentes

---

Existen muchos tipos de materiales constituyentes de los compuestos FRP que son comerciales. La combinación apropiada de estos materiales constituyentes nos permite el desarrollo de cualquier sistema de compuestos FRP que nos puede dar ciertos atributos de comportamiento para el uso que se requiere. El comportamiento de los compuestos FRP se puede predecir en la interacción entre los materiales constituyentes seleccionados (fibra de refuerzo, sistema de resina, aditivos), la determinación de la microestructura/arquitectura y la configuración geométrica así como la influencia de un proceso apropiado de fabricación. En algunos casos, se pueden utilizar procesos de fabricación múltiples para producir un producto. Cada constituyente contribuye a la durabilidad y a la vida de servicio del compuesto. Un compuesto FRP diseñado apropiadamente tiene la fibra correcta, tamaño, resina y método de fabricación que lo llevan a ser resistente al ambiente en el cual va a ser usado.

Como refuerzo, existen tres tipos de fibras que se pueden utilizar. Las fibras de vidrio E son las más susceptibles a la degradación debido a la humedad y la alcalinidad. Las fibras de carbono son relativamente inertes al ambiente. Las fibras de aramida tienen mayor resistencia a la abrasión y al impacto pero muestran ser propensas a la fluencia, absorción de humedad y degradación bajo la exposición ultravioleta. Los compuestos diseñados asumen que una fibra individual es encapsulada en un sistema apropiado de resina para formar un compuesto. Así, podemos decir que las fibras son protegidas del ambiente por la resina. La durabilidad del sistema de resina depende de la química, la formulación y el curado. La industria de los compuestos tiene muchos tipos de resinas que son diseñadas para aplicaciones específicas finales y deben ser escogidas dependiendo de las consideraciones mecánicas, físicas, químicas, eléctricas u otras consideraciones del ambiente de operación.

---

## 4.3 Efectos ambientales que afectan la durabilidad

---

Se ha hecho un análisis de varios efectos ambientales en los compuestos FRP que están relacionados con la durabilidad de estos materiales y de sus componentes estructurales. Las fuentes incluyen la información y anécdotas, derivadas de la experiencia de la industria de los compuestos FRP.

### *4.3.1 Absorción de Humedad (Agua)*

Las resinas representan un porcentaje de absorción que depende de la estructura de la resina, el grado de curado y la temperatura del agua. Los dos efectos principales son aquéllos como la hidrólisis y el cambio de la temperatura de transición en el vidrio. En general, los efectos de la humedad a corto tiempo causan degradación en los niveles de capacidad de esfuerzo así como en los niveles de rigidez en un compuesto. La absorción de humedad en los compuestos

depende del tipo de resina, composición laminar, espesor, calidad laminar, condiciones de curado, interfase fibra/ resina y proceso de fabricación. En algunos casos, el comportamiento puede mejorar con el uso de una barrera para la corrosión. Se debe consultar al fabricante considerando el comportamiento a la humedad en un sistema de compuestos FRP para una aplicación específica en ingeniería civil.

#### *4.3.2 Soluciones Alcalinas*

Las soluciones alcalinas, tales como la solución de poro del concreto, tienen un alto pH y una alta concentración de iones alcalinos. Esta combinación no tiene efecto en el refuerzo de carbono pero puede llevar a la degradación de la matriz de resina o en los niveles de interfase. El daño a la resina vía alcalina es generalmente más grave que el debido a la humedad. Las fibras de vidrio E deben ser diseñadas apropiadamente y fabricadas con la resina indicada para proteger al refuerzo del ataque alcalino.

#### *4.3.3 Soluciones químicas agresivas*

Los compuestos FRP generalmente tienen un buen comportamiento al ser expuestos a soluciones como ácidos o corrosivos. Su comportamiento es influenciado principalmente por el tipo de resina. Los compuestos FRP son ampliamente usados en aplicaciones en contacto con químicos agresivos tales como petróleo y producción de gas, procesos químicos y tratamiento de aguas residuales. Existen equipos fabricados con compuestos FRP que son utilizados para la producción de sal de mar, cloro, solventes orgánicos, aceites hidrocarbonicos y ácidos. Además, los tubos, tanques (arriba y abajo del suelo) y equipo auxiliar (campanas industriales, enrejados, chimeneas, etc.) son fabricados usando como refuerzo vidrio E con resinas de poliéster isoftálicas, vinilester, epóxico, fenólicas y termoplásticas.

La industria de los compuestos FRP utiliza la norma ASTM C581 " Práctica Estándar para Determinar la Resistencia Química de las Resinas Termofijas para Estructuras Líquidas" como método de prueba para estimar el comportamiento del grado de corrosión en la resina a largo plazo. La experiencia sugiere que la selección apropiada y la fabricación de compuestos FRP para puentes y otras aplicaciones debe soportar los ataques químicos comunes que existen en las carreteras.

#### *4.3.4 Exposición al Congelamiento y Descongelamiento*

Los compuestos muestran buena resistencia al congelamiento – descongelamiento y resisten muchos años sometidos a condiciones sub – cero y cientos de ciclos de congelamiento – descongelamiento con un mínimo de pérdida de sus propiedades. En general, el congelamiento y deshielo no afecta las fibras pero puede afectar la resina y la interfase fibra/ resina. Los sistemas poliméricos de resina son conocidos por su fragilidad, resultando en un incremento de la rigidez bajo condiciones sub – cero (pero no criogénicas). Un procedimiento

apropiado de diseño toma en cuenta las condiciones climáticas que pueden mitigar estos rubros.

#### *4.3.5 Ciclo Térmico y Temperatura (Arriba de Cero)*

Con el rango de temperaturas normales de operación vistas en el ambiente de las estructuras, se puede anticipar que con un sistema seleccionado y producido correctamente no existirán cambios mayores. El efecto principal de la temperatura es la respuesta viscoelástica de la resina. Si la temperatura excede la temperatura de transición ( $T_g$ ) del vidrio, por ejemplo, el comportamiento del compuesto FRP puede ser afectado. Los productos diseñados para aplicaciones de ingeniería civil deben usar resinas con una suficiente  $T_g$  tal que el ambiente de servicio y operación no sea un factor que afecte su comportamiento. Por lo general, en construcciones se utilizan de  $5^\circ\text{C}$  a  $60^\circ\text{C}$  como menor y mayor valor de exposición al ambiente. Los materiales FRP pueden ser diseñados para un desempeño satisfactorio en un gran rango de temperaturas. Se debe consultar al fabricante de FRP para definir el rango de temperatura de servicio del material FRP. De cualquier forma, se debe tener cuidado en diseñar los sistemas de unión adhesiva o anclaje para asegurarse que éstos no sean débiles, ya que éstos tienden a perder sus propiedades conforme aumenta la temperatura. El ciclo térmico, en general, no causa efectos perjudiciales, además, la susceptibilidad de la resina que se extiende puede resultar en microgrietamientos.

#### *4.3.6 Fluencia y Relajación*

Como las fibras de carbono y vidrio muestran un comportamiento lineal – elástico casi perfecto a la falla, la adición de fibras de refuerzo aumenta la resistencia a la fluencia de la mayoría de las resinas termofijas. Para la mayoría de los compuestos FRP la deformación por fluencia se convierte en la consideración más importante a niveles de grandes esfuerzos o altas temperaturas o en su defecto a la combinación de esfuerzo y temperatura. La fluencia no será un factor significativo si las cargas de la estructura se mantienen con los niveles de carga que recomienda el fabricante. Por lo general, los compuestos termofijos (poliéster no saturado, viniléster, epóxicos y fenólicos) son más resistentes a la fluencia que los compuestos termoplásticos (Polipropileno, nylon, policarbonatos, etc.).

Las fibras de carbono no tienen una degradación de esfuerzo inducido químicamente, pero muestran un mayor efecto con el tiempo que las fibras de vidrio o aramida. Para las aplicaciones típicas de ingeniería civil y construcción como un puente o la plataforma del mismo, las propiedades de relajación esfuerzo – fluencia son dominadas por propiedades de la resina, más que por la fibra o las propiedades de la interfase. Los compuestos FRPV, tradicionalmente son diseñados para asegurar que los niveles de esfuerzo bajo una carga sostenida no excedan del 25 al 30% de la carga última para alcanzar la falla prematura debido a la ruptura por esfuerzo. Las resinas que están mal curadas son susceptibles a la fluencia durante los primeros años de servicio. Esta susceptibilidad disminuye con el tiempo conforme el curado va madurando.

#### ***4.3.7 Carga de Fatiga***

Los compuestos FRP muestran una resistencia a la fatiga mejor que la de los materiales metálicos. Por otra parte, las estructuras de compuestos FRP siguen siendo susceptibles a la falla en las uniones y conexiones bajo las cargas de fatiga y deben ser diseñadas para reducir las concentraciones de esfuerzo y las discontinuidades geométricas. Las fallas por fatiga en los compuestos FRP inicia generalmente a través de la interfaz de la matriz/ fibra y el microagrietamiento de la resina. La información de fatiga en aplicaciones estructurales es muy limitada, pero los datos disponibles indican que la falla a la fatiga es difícil que ocurra en los niveles inferiores de esfuerzo a excepción de las uniones y conexiones.

#### ***4.3.8 Radiación Ultravioleta (UV)***

Los materiales poliméricos conllevan a la degradación cuando son expuestos a la radiación ultravioleta entre 290 y 400 NM debido a la disociación de los adhesivos químicos. La reacción subsiguiente con el oxígeno puede llevar a la oxidación, corte en cadena y/o enlace transversal. En general, los efectos son raramente severos en términos de degradación mecánica, además algunas resinas pueden mostrar una susceptibilidad significativa a la erosión de la superficie. Los efectos más dañinos de la exposición UV no son al daño relacionado con los rayos UV, lo cual está limitado a la superficie, pero la potencialidad de la penetración de humedad y otros agentes que dañan cierta región. Los compuestos FRP pueden ser protegidos de la degradación por UV con el uso apropiado de aditivos en la resina o con la aplicación de recubrimientos.

#### ***4.3.9 Exposición al Fuego y Altas Temperaturas***

Todos los sistemas poliméricos son degradados por la presencia de calor extremo en periodos prolongados de tiempo. El principal efecto en la mayoría de la exposición al fuego o altas temperaturas es la degradación de la resina y su debilitamiento seguido por la carbonización de las capas de la superficie, que por lo general causan que los compuestos FRP se extingan a sí mismos. La resistencia al fuego puede ser aumentada con el uso de resinas como las fenólicas, aditivos especiales resistentes al fuego, recubrimientos intumescentes y la adición de materiales de relleno inorgánicos (arcillas microfinas, trihidrato de aluminio, etc.) dentro de la resina en los procesos de fabricación. En concreto reforzado con FRP, el concreto actúa por sí mismo como una barrera térmica, reduciendo los efectos de la carga térmica.

#### ***4.3.10 Impacto***

Los impactos accidentales o los daños no intencionados pueden resultar en pérdidas significativas en su desempeño. En general, los compuestos FRP de aramida y los compuestos FRP de vidrio son los más resistentes al impacto, y siendo los compuestos FRP de carbono los más sensibles al daño por impacto. En aplicaciones aeroespaciales, los compuestos FRPC han sido diseñados bajo un criterio de tolerancia al daño, el cual establece que los niveles de deformación bajo las cargas de impacto no deben exceder del 35 al 40 % de la carga última. El daño por impacto puede iniciarse lejos de la falla en la interfase resina - fibra, en la matriz misma y en la separación de fibras individuales. Se debe consultar a los fabricantes para visualizar el funcionamiento exacto de los compuestos FRP para usos específicos de ingeniería civil.

En general, la selección apropiada de los materiales constituyentes, el diseño y el proceso de fabricación determinan la durabilidad de los compuestos FRP. Además, varios de los constituyentes pueden ser afectados por las condiciones ambientales, el diseño apropiado de estructuras con compuestos FRP con factores de seguridad adecuados. Los recubrimientos protectores y la configuración de los materiales nos dan un nivel más alto de durabilidad bajo ambientes muy agresivos. Los puentes con compuestos FRP prediseñados, las plataformas de puentes, barras, pilotes y sistemas de reparación están disponibles comercialmente y han sido desarrollados con la intención de dar una vida útil de servicio mayor en las aplicaciones finales.

Es altamente recomendable consultar a los fabricantes de los compuestos FRP para conocer el comportamiento específico. Es importante también que el dueño y el ingeniero definan las condiciones de servicio para asegurar que el fabricante pueda dar la mejor solución con el mejor diseño.

Específicamente las barras FRP son susceptibles a la degradación de resistencia y rigidez en presencia del ambiente antes, durante y después de la construcción. Estos ambientes, como se ha mencionado anteriormente, incluyen al agua, exposición ultravioleta, temperaturas elevadas, soluciones alcalinas y ácidas. La resistencia y rigidez pueden aumentar o disminuir o mantenerse igual dependiendo de un material particular y las condiciones de exposición. La tensión y la adherencia de las barras FRP son los principales parámetros de interés para las construcciones de concreto reforzado.

La condición del ambiente que más interés ha tenido por parte de los investigadores con respecto a las barras FRP es la alta alcalinidad en el agua encontrada en estructuras de concreto externo<sup>1</sup>. Existen métodos que sirven para acelerar la degradación de la resistencia de la barra con filamentos de vidrio en concreto usando temperatura<sup>2</sup> y ha sido usada en materiales FRPV para predecir su comportamiento a largo plazo en soluciones alcalinas. Esto no ha sido sustancial a la fecha, de cualquier forma, existen otros métodos de aceleración para las barras de vidrio (donde sólo la reacción química controla la degradación) que son aplicados a compuestos FRPV.

Muchos investigadores son de la opinión que las resinas vinilester tienen mayor resistencia al ingreso de humedad en comparación con otras resinas comunes. El tipo de la fibra también

---

<sup>1</sup> Gerritse, A., "Durability Criteria for Non Metallic Tendons in an Alkaline Environment", Proceedings of the First International Conference on Advance Composite Materials in Bridges and Structures, Canadá, 1992

<sup>2</sup> Litherland, K.L. et al, "The Use of Accelerated Aging Procedures to Predict the Long Term Strength of GRC Composites", Cement and Concrete Research, vol.11 No. 3, 1981

parece ser un factor importante en la resistencia alcalina de las barras FRPV<sup>3</sup>. Las reducciones en la resistencia a tensión en la barras FRPV van del 0 al 75% de los valores iniciales. Las reducciones en la rigidez a tensión van desde 0 a 20% para las barras FRPV. La resistencia y rigidez a tensión de los cables FRPA en elevadas temperaturas y soluciones alcalinas con o sin carga a tensión aplicada se menciona que decrece entre 10 y 50 % y de 0 a 20% de los valores iniciales, respectivamente<sup>4</sup>. En el caso de FRPC, la resistencia y rigidez se ha mencionado que decrece entre 0 y 20%<sup>5</sup>.

La exposición de las barras FRP a los rayos ultravioleta y a la humedad antes de su colocación en el concreto pudiera afectar su resistencia a la tensión debido a la degradación de los polímeros que las constituyen, incluyendo a las fibras de aramida y todas las resinas. Las prácticas de construcción apropiadas y los aditivos para las resinas pueden aminorar significativamente este tipo de problemas debidos al clima. Algunos de los resultados en pruebas en donde se combinan la exposición a los rayos ultravioleta y a la humedad con y sin carga aplicada a las barras ha mostrado que la resistencia a tensión se reduce de un 0 a un 20% de los valores iniciales en FRPC, de 0 a 30% en FRPA y de 0 a 40% en FRPV<sup>6</sup>.

Añadiendo varios tipos de sales a las soluciones en donde las barras FRP están inmersas, ha demostrado que no necesariamente se tiene que hacer una diferencia entre la resistencia y la rigidez de muchas barras FRP en comparación con soluciones sin sales<sup>7</sup>. En muchos estudios no se separan los efectos del agua y la sal añadida al agua; un estudio encontró una reducción de 0 al 20% de la resistencia a tensión inicial en barras FRPV sujetas a una solución salina a temperatura ambiente y de congelamiento y deshielo<sup>8</sup> y en otro se encontró un 15% de reducción en la resistencia de las barras FRPA en ambientes marinos<sup>9</sup>.

Estudios de durabilidad de la adherencia entre los FRP y el concreto han sido enfocados con la humedad y el ambiente alcalino presente en el concreto. La adhesión del refuerzo FRP depende de la transferencia de las fuerzas cortantes y transversales a la interfase entre la barra y el concreto y entre las fibras individuales con la barra.

En ambientes que degradan la resina polimérica o la interfase resina/ fibra son también degradadores de la resistencia a la adhesión en una barra FRP. Se han propuesto muchos métodos de prueba para determinar la adhesión de las barras FRP, sin embargo, la prueba de jalar directamente tiene mayor aplicación popular debido a su simplicidad y bajo costo<sup>10</sup>.

<sup>1</sup> Devalapura R.K. et al., "Advanced Composite Materials in Bridge and Structures", Sociedad Canadiense de Ingenieros Civiles, 1996

<sup>2</sup> Takewaka, K. y Khin, M., "Deterioration of Stress - Rupture of FRP Rods in Alkaline Solution Simulating as Concrete Environment", Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, CSCE, 1996

<sup>3</sup> Sasaki I. et al., "Durability Evaluation of FRP Cables by Exposure Test", Japan Concrete Institute, Tokyo, 1997.

<sup>4</sup> Rahman, H.; Kingsley, C. y Ciimi, J., "Fatigue Behavior of a Carbon FRP Grid Encased in Concrete", Japan Concrete Institute, 1996

<sup>5</sup> Vijav, P. y GangaRao, H., "Unified Limit State Approach Using Deformability Factors in Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars", Proceedings of the Fourth Materials Engineering Conference, 1999

<sup>6</sup> Sen, R. et al., "Durability of Aramid Pretensioned Elements in a Marine Environment", Revista Estructural del ACI, septiembre - octubre, 1998

<sup>7</sup> Nanni, A., Bakis, C. y Boothby, T., "Test Methods for FRP Concrete Systems Subjected to Mechanical Loads: State of Art Review", Revista de Plásticos Reforzados y Compuestos, 1995

<sup>8</sup> Porter, M. y Barnes, B., "Accelerated Aging Degradation of Glass Fiber Composites", 2a Conferencia Internacional de Compuestos en la Infraestructura, 1998

La habilidad de los agentes químicos para pasar a través del concreto a la barra FRP es otro factor de suma importancia que afecta a la resistencia a la adhesión <sup>19</sup>. Además los ingenieros estructurales deben consultar siempre a los productores para poder obtener los factores de durabilidad.

Así como ya se ha mencionado a las barras FRP, los tendones y las mallas son susceptibles de daño durante la instalación, por esto se necesitan tomar precauciones especiales en su manejo y colocación. Los diseñadores tienen la obligación de incluir notas precautorias en los planos.

Los componentes FRP necesitan estar protegidos durante su arribo y manejo en el sitio de trabajo. Algunos de estos componentes, son los tendones FRP con sus anclajes que son menos robustos que sus contrapartes de acero y son susceptibles a ser dañados durante su tendido, arrastre o doblado. Los componentes FRP deben ser almacenados y protegidos de la lluvia, calor excesivo y de los rayos solares directos. Cuando se instalan los tendones FRP se debe tener sumo cuidado para no causar un daño por apisonamiento o doblez. Para cortar FRP se debe usar una cortadora de alta velocidad o sierras de diente fino. El calentamiento o el corte con gas puede dañar al FRP y puede ser peligroso para el operador. Los tendones deben ser jalados por medio de cables directores a través de los ductos de post tensado y jamás deben ser empujados. Durante el reforzado, el mecanismo de sujeción no debe ser aplicado en la misma locación.

En general, la colocación de las barras FRP es muy similar a las prácticas comunes con barras de acero, sólo con algunas excepciones, por ejemplo, el refuerzo FRP debe ser colocado sobre "poyos" (de preferencia de plástico o no corrosivos) y las especificaciones para éstos deben aparecer en el proyecto; el refuerzo FRP debe estar fijo para prevenir movimientos laterales durante la colocación del concreto; el doblado de las barras FRP no debe ser permitido en el sitio de trabajo; y cuando se necesita un refuerzo continuo se deben usar traslapes, la longitud del empalme varía con la resistencia del concreto, tipo de concreto, grado de la barra, diámetro, superficie y espaciamiento.

La fuerza de tensión en los tendones FRP debe estar en monitoreo por celdas de carga calibradas hidráulicamente o por medio de otros aparatos compatibles. Debido a que los tendones FRP son quebradizos y pueden romperse repentinamente durante su esforzamiento, debe haber personal de operación que tome medidas de precaución contra alguna explosión debida a la energía almacenada en estos tendones durante el proceso.

Cuando se coloca el concreto, se debe tener cuidado de no dañar las barras, tendones o mallas de FRP con los vibradores o varillas, además se debe tener cuidado con los vibradores externos o vibradores internos cubiertos de plástico o si ambos son usados. El concreto reforzado con FRP debe ser curado con agua y no con calor o autoclave. Durante el curado, la temperatura del vapor debe permanecer por abajo de los 40° C.

Además se debe tener un control de calidad de todos los elementos FRP, el cual se lleva a cabo por pruebas de un laboratorio propio o privado. Para cada lote de FRP se recomienda hacer pruebas de resistencia a la tensión, módulo de elasticidad y deformación última.

## ANÁLISIS DE COSTOS DEL CICLO DE VIDA

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, los nuevos materiales FRP están siendo desarrollados por la industria que los ha empezado a utilizar en aplicaciones de construcción debido a las ventajas sobre los materiales tradicionales como el acero, concreto, madera y aluminio.

Sin embargo, muchos de estos materiales de alto desempeño no han sido usados en gran escala en proyectos de construcción debido a las barreras económicas y técnicas. La principal barrera económica del uso de estos materiales FRP es su alto costo inicial. Con respecto a cómo el costo hace efectivo un material por encima del ciclo de vida del proyecto, los obstáculos que ponen las industrias es el elevar los costos de obra, particularmente cuando los costos del ciclo de vida de un material nuevo son relativamente desconocidos. Alemania, Japón y Estados Unidos tienen el liderazgo mundial en el uso de FRP en la construcción; si las compañías mexicanas quieren entrar a una competencia global, deben empezar a introducir materiales de nuevas tecnologías como los FRP en sus proyectos. Si bien es cierto que los métodos de análisis deben de cumplir con la reglamentación vigente para los proyectos, se debe desarrollar también una cultura de análisis del ciclo de vida de las estructuras.

### 5.1 Modelo del Costo del Ciclo de Vida

---

El método general que se presenta a continuación fue desarrollado por el National Institute of Standards and Technology (NIST) y se enfoca al uso de nuevos materiales en la construcción, que al igual pueden ser aplicables a materiales y proyectos no específicos a la construcción. Es importante mencionar que se hará referencia a un proyecto de puente carretero, ya que es el

proyecto donde existe mayor información de literatura, se podrá aplicar a los demás proyectos de ingeniería civil<sup>1</sup>.

En la figura 5.1 se muestra la consideración de los materiales de nuevas tecnologías como parte integral del proceso de construcción. Las Necesidades del Consumidor están representadas en la parte superior izquierda como parte principal del Proceso de Diseño, en la cual la instalación es planeada y propuesta para satisfacer las necesidades. Durante la etapa de Planeación del Concepto, la forma básica y la función de la instalación es esquematizada. Durante la fase de Diseño Preliminar, son considerados los materiales alternativos para la construcción así como diferentes configuraciones de estos. Finalmente, se esquematizan en la fase de Diseño de Parámetros las medidas de los miembros estructurales, detalles de conexión e instrucciones de ensamblado. La estructura o instalación generada por este Proceso de Diseño pasa a través de diferentes fases en su Ciclo de Vida del Proyecto: Construcción, Operación, Mantenimiento y Reparación o su Destrucción/ Deshabilitamiento.

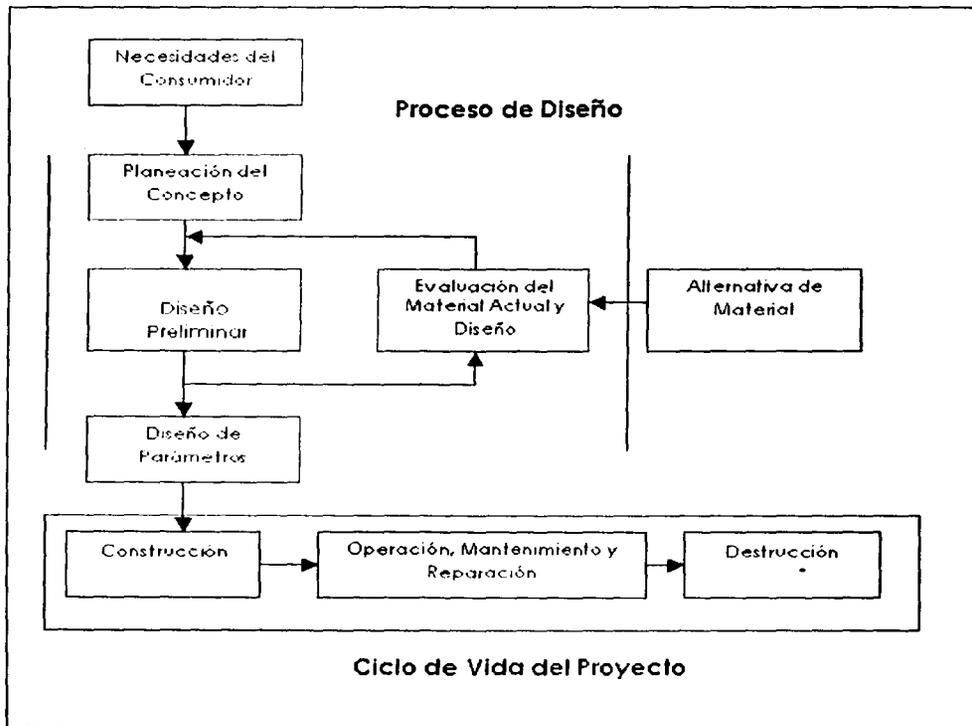


Figura 5.1 Proceso de Diseño, Construcción y Utilización de la Instalación

<sup>1</sup> Ehlen, Mark A., "The Economics of New Technology Materials: A Case Study of FRP Bridge Decking", National Institute of Standards and Technology, 1996.

Durante la fase de Diseño Preliminar se debe tener un grupo de materiales iniciales así como su diseño. Este diseño preliminar es evaluado después contra las alternativas de materiales/ diseño posibles. El criterio usado para esta evaluación, por lo general, depende de factores como el nivel de conocimiento local de los diseñadores y de los constructores quienes construirán las instalaciones. El criterio económico para seleccionar los materiales de construcción y el diseño, por lo general, es la alternativa más barata, excluyendo a los nuevos materiales, los cuales pueden ser más efectivos en costo en términos de ciclo de vida.

Existen muchos métodos económicos para evaluar materiales de nuevas tecnologías. Cuando un proyecto tiene objetivos que no son cuantificables, al tomar las decisiones se utilizan métodos de decisión multivariable para evaluar las alternativas. En el sector público se está familiarizado con métodos de análisis económicos que miden beneficios (o ahorros) y los costos atribuibles a los diversos proyectos. Estos métodos ayudan a determinar si los proyectos públicos están siendo benéficos o ahorran lo suficiente que justifiquen el costo del proyecto. Algunos ejemplos son: costo del ciclo de vida, beneficios netos (ahorros), relación beneficio – costo (Ahorro – Inversión).

El análisis de costo del ciclo de vida (ACCV) consiste en evaluar varias alternativas de inversión para cuantificar el costo más substancial asociado con cada inversión a través de la elección de un periodo de análisis o vida de la inversión. Para estructuras de puentes, estos costos están incluidos en los costos de construcción inicial, costos de rehabilitación y costos del usuario. La clave en cualquier ACCV es la de cuantificar las variables críticas usadas en el análisis tan actualizadas como sea posible. Desde que la mayoría de las variables no tienen valores definidos, es necesario realizar un análisis de sensibilidad para identificar las variables que impactan significativamente el resultado del análisis. El análisis de sensibilidad consiste en identificar los valores más altos y más bajos para las variables críticas y la evaluación correspondiente al cambio en el costo de vida útil para cada uno de estos valores.

---

## 5.2 Método de Análisis del Costo de Vida

---

El método de análisis de costo del ciclo de vida de los nuevos materiales FRP tiene tres características importantes, la primera, es una propuesta basada sustancialmente en el proyecto; esto es, el método calcula los costos del ciclo de vida de estructuras típicas tales como los pasos superiores en las carreteras. Segundo, el método permite al diseñador elegir cualquier material de construcción que satisfaga los requerimientos del proyecto, por ejemplo, construir un paso superior de dos carriles con dos claros, el diseñador puede especificar cada material que satisfaga una serie de requerimientos, incluyendo que el paso superior debe resistir las cargas de diseño; no flexionarse entre claros más de los límites preestablecidos y que dure un determinado número de años. Ninguno de los requerimientos asume o excluye el uso de un material en particular. La tercer característica importante del método es que incluye un esquema de clasificación de costos, el cual permite al diseñador comparar las ventajas y desventajas intrínsecas del costo del ciclo de vida de un material nuevo contra los materiales convencionales. Los pasos que se deben seguir en el método CCV son los siguientes:

1. Definir el objetivo del proyecto y los requerimientos técnicos.
2. Identificar las alternativas que satisfagan el objetivo y los requerimientos del proyecto.
3. Establecer suposiciones básicas para el análisis aplicables a todas las alternativas.
4. Identificar, clasificar y estimar todos los costos que puedan ocurrir a lo largo del ciclo de vida.
5. Calcular el Costo de Ciclo de Vida de cada alternativa.
6. Realizar análisis de sensibilidad.
7. Comparar las alternativas de Costos de Ciclo de Vida.
8. Considerar otros efectos del proyecto.
9. Seleccionar la mejor alternativa.

En el primer paso, el diseñador debe definir el proyecto específico, por decir, el paso superior de dos carriles. El paso da una comparación de los materiales evaluados de la misma forma, es decir, el proyecto es un paso superior, no un paso superior hecho con concreto. Actualmente los constructores e ingenieros no usan los nuevos materiales ya que se basan en prácticas dictadas por reglamentos o códigos que manejan materiales específicos. En el paso 1 se permite que solamente se establezcan los requerimientos mínimos del proyecto, tales como las cargas, capacidad de carga y deflexiones. En el paso 2, el diseñador puede seleccionar materiales alternativos que satisfagan los requerimientos del paso 1.

En el paso 3, el diseñador estima los parámetros del proyecto que son comunes a todos los materiales alternativos tales como flujo de tráfico sobre y bajo del puente o paso en cuestión, el valor del tiempo de los conductores cuando se retrasan debido a la trabajos de construcción y la tasa a la cual el valor futuro debe ser restada del valor presente. Se debe concentrar en los atributos del proyecto que no está a la par de un material específico.

### 5.2.1 Esquema de Clasificación de Costos

Cada alternativa de costos es estimada en el paso 4. En la figura 5.2 se ilustra el método del esquema de clasificación de costos que nos ayuda a comparar las alternativas de materiales de construcción. La clasificación de costos asegura que todos los costos del proyecto son contabilizados y ayuda a categorizar todas las actividades del proyecto. Cada actividad de un proyecto ocurre en un determinado tiempo, ocurre en una o más partes del proyecto y afecta (monetariamente) a un individuo o constructora. Cada actividad del proyecto genera un "costo de proyecto". La clasificación de los costos categoriza cada uno de estos dependiendo de tres características: (1) Cuando el costo ocurre; (2) que componente del proyecto genera el costo; y (3) qué individuo o entidad incurre en el costo. Agrupando los costos del proyecto de acuerdo a estas características, permite al diseñador comparar los costos de ciclo de vida de los materiales competentes de una manera útil. Por ejemplo, qué material alternativo tiene el mayor mantenimiento y costo de reparación, el mayor costo inicial ó el mayor costo a los usuarios.

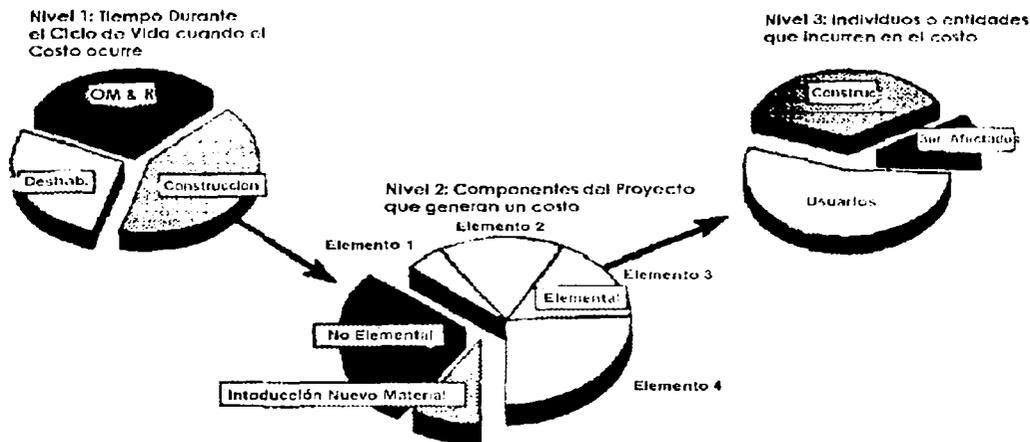


Figura 5.2 Costo del Proyecto agrupados de acuerdo con el Esquema de Clasificación de Costos

Fuente: Life Cycle Costs of New Material, Journal of Infrastructure Systems, 1997

La figura 5.2 nos muestra cómo la clasificación de los costos es jerárquica, el costo de ciclo de vida de una estructura se divide primero en los costos de construcción; costos de operación, mantenimiento y reparación (OM&R); y los costos de destrucción o deshabilitamiento (Nivel 1 en la Fig. 5.2). Cada uno de estos tres componentes es dividido después en grupos de costos de acuerdo a dónde se originó el costo (Nivel 2): costos elementales (Por ejemplo la superestructura), costos no elementales como la movilización de la construcción o la introducción de costos de nuevas tecnologías como evaluaciones no destructivas de la estructura de un material nuevo. Cada uno de los costos de los componentes del proyecto es finalmente dividido en grupos de acuerdo a si la constructora, el usuario o los terceros afectados pagarán el costo (Nivel 3).

El propósito central de esta clasificación es el de expresar las ventajas y desventajas técnicas del nuevo material en términos de costo de ciclo de vida. Las categorías del nivel 1 cuantifican las ventajas y desventajas de material sobre la vida de servicio de la estructura usando periodos de tiempo estándar. Las categorías del nivel 2 determinan qué componente del proyecto ahorra o gasta más dinero cuando se construye con un material nuevo. Finalmente, las categorías del nivel 3 aseguran que el impacto tecnológico del material nuevo en todas las partidas es contabilizado. Los costos de administración y los costos de usuario se deben calcular frecuentemente, los costos de los terceros afectados son contabilizados para aquellas personas que utilizan la estructura directamente pero que son afectadas por las actividades del proyecto.

### 5.2.2 Costos de Introducción de Nuevas Tecnologías

El último tipo de componente del nivel 2 son los costos de introducción de nuevas tecnologías. Estos costos son generados de la prueba, evaluación, traer el nuevo material para su aceptación. Algunos ejemplos específicos de estas actividades son <sup>2</sup>:

- Pruebas de laboratorio del material
- Consultoría externa en diseño e implementación
- Pruebas destructivas
- Pruebas a gran escala
- Pruebas no destructivas
- Proyectos de demostración

Por ejemplo, en el caso de la plataforma de un puente que se construye con Compuestos FRP, deben contemplarse costos de pruebas en sitio y monitoreo que se llevan a cabo en la instalación y que deben ser clasificados como costos de introducción de una nueva tecnología. Por lo tanto, es importante estimar estos costos porque realmente son costos del proyecto.

Además, estos costos de introducción nos permiten comparar los costos a corto y largo plazo usando un material FRP. En el corto plazo, un material nuevo nos crea costos adicionales debido a un diseño adicional, tiempo perdido con los fabricantes, diseñadores y especialistas en el material y la evaluación del comportamiento del material en la vida de la estructura. En el largo plazo, estos costos desaparecen cuando el material obtiene una aceptación y un protocolo de monitoreo similar a de los materiales convencionales.

Siguiendo con nuestro ejemplo, la instalación de la plataforma de un puente, está clasificado como el Nivel 1 Costo de Construcción y Nivel 2 Costo de la Plataforma o Losa, al final se clasifica también acorde a un individuo o entidad que incurre en el costo: (1) La constructora que tiene o hace el mantenimiento de la estructura; (2) el usuario de la estructura durante las actividades del proyecto y (3) los terceros afectados que no son directamente ni constructores ni usuarios del proyecto, pero son afectados por las actividades del mismo. Los costos adicionales a los usuarios de una carretera durante la instalación de la plataforma pueden ser clasificados como costos de usuario. Las fórmulas para calcular estos costos se dan más adelante.

Como se ha mencionado anteriormente, los costos de los terceros afectados son incurridos por individuos que no son usuarios directos del proyecto pero que son afectados de alguna manera por las actividades. Un costo importante de terceros afectados que cada día toma mayor auge son los costos ambientales de los materiales de construcción. La categoría de terceros afectados nos permite no solo incluir la manera de bajar los costos ambientales como la contaminación de tierras causada por las emisiones tóxicas, pero también los costos ambientales que se elevan por la contaminación resultante de la extracción, fabricación y transportación del material de construcción. Estos costos ambientales son suficientes para eliminar las ventajas de otros materiales particulares.

<sup>2</sup> Rosen, H.J. y Bennett, P. M. "Construction material evaluation and selection: a systematic approach". John Wiley and Sons, Nueva York 1979

Cada costo individual del proyecto se categoriza de la misma manera que los costos de instalación del ejemplo de la plataforma del puente. El esquema de clasificación permite después al diseñador comparar los materiales para la estructura de acuerdo a las ventajas y desventajas de sus costos de ciclo de vida. El costo de cada material alternativo se calcula con la suma de todos los costos del proyecto que puedan ocurrir a través de su vida útil.

El paso 6 del método de costo de ciclo de vida es una parte fundamental para evaluar los nuevos materiales de construcción FRP. Los costos y el desarrollo técnico de los FRP son inciertos, y este método debe atender esta incertidumbre. Los costos reales de construcción, mantenimiento y deshabilitación de una estructura con nuevos materiales FRP son menos confiables que los mismos costos de los materiales convencionales usados. Por ejemplo, se dice que costo anual de una reparación convencional de una plataforma de concreto reforzado está entre usd \$ 2.00 y usd \$2.10 por metro cuadrado, una plataforma similar de compuestos FRP está estimada de usd \$ 0.50 y usd \$ 5.00 por metro cuadrado<sup>1</sup>. Esta variabilidad de los costos de las plataformas de FRP pueden afectar enormemente el costo del ciclo de vida de toda la estructura. Una estructura de FRP que tiene por una experiencia prematura la probabilidad de fallar y requiera de una rehabilitación o reemplazamiento tiene una expectativa de costo alto que una que no falle prematuramente. Los métodos de análisis de riesgo y las simulaciones Monte Carlo pueden ser usados para calcular las distribuciones acumulativas de los costos para cada alternativa.

En el paso 7 la clasificación de costo se enfoca al trabajo. Esta clasificación permite al analista calcular las ventajas y desventajas de cada material en términos de costo de ciclo de vida. El paso 8 permite al usuario considerar otros factores del proyecto que no pueden ser cuantificados; por ejemplo las condiciones de arquitectura pueden llevar a que unos materiales hagan menos deseable a la estructura estéticamente, y algunas emisiones ambientales que no son cuantificables. Algunas herramientas adicionales pueden ser usadas, como un análisis de decisión multivariable. Y finalmente, en el paso 9 se selecciona el material de construcción más efectivo.

### 5.3 Beneficios del Costo de Vida Útil de los Materiales FRP

La manera tradicional de llegar a una evaluación económica de las diferentes alternativas de inversión en la industria de los puentes es la de evaluar y comparar solamente los costos de construcción inicial. Este método de evaluación económica resulta en una percepción incorrecta del costo real a largo plazo de una alternativa. Esto es especialmente cierto en el caso de una alternativa en la cual los materiales y componentes de fibras de refuerzo con polímeros (FRP) pueden tener un costo inicial mayor pero ofrecen significativos ahorros en los costos debido a su durabilidad a largo plazo y aumento en la velocidad de construcción, por mencionar sólo algunas. Adicionalmente, reducen los costos de rehabilitación, al aumentar la durabilidad; también reduce futuros costos asociados con permitir el tráfico de vehículos durante la rehabilitación del puente.

---

Ehlen, Mark; "Life Cycle Costs of New Construction Materials", National Institute for Standards and Technology, 1999

Estos atributos de durabilidad y velocidad de construcción de los componentes FRP resulta en un menor costo de vida útil. Este método ACCV ha mostrado que las plataformas de puentes con FRP usadas en puentes convencionales a base de vigas múltiples, pueden reducir el costo de vida útil de un puente en cualquier lugar de 10 a 30 por ciento después de 75 años de diseñado. El mayor componente del ahorro de costos es la reducción de los costos de usuario asociados con el aumento de la velocidad de construcción y menor impacto en el tráfico debido a la reducción en el mantenimiento y rehabilitación. Se encontró que los costos de usuario llevan a una cantidad mucho mayor que el 80% del costo de vida útil de un puente<sup>4</sup>.

## 5.4 Formulas

El costo de vida útil como una alternativa es representada por cada costo presente o su equivalente uniforme de costo anual de todos los gastos presentes y futuros asociados con la alternativa. La ecuación para calcular el costo de vida útil de una alternativa en día presente en dólares es la siguiente <sup>4</sup>:

$$\text{Valor Presente CCV} = \sum_{n=0}^T F_n (1+i')^{-n}$$

donde:

CCV: Costo del Ciclo de Vida

F: es la suma de todos los gastos en el tiempo n

i': es el interés relacionado a la inflación

T: es el número total de los periodos compuestos en años

El equivalente del costo anual uniforme de la alternativa puede ser calculado primero determinado la valor presente del costo del ciclo de vida con la fórmula antes citada y después aplicando la siguiente ecuación <sup>4</sup>:

$$\text{Equivalente Uniforme Anual CCV} = \text{Valor Presente CCV} * \left[ \frac{(i' (1+i')^n)}{((1+i')^n - 1)} \right]$$

<sup>4</sup> Newnan, Donald G. "Engineering Economic Analysis", Third Edition. Engineering Press, Inc., 1988.

La tasa de interés usada en los cálculos debe ser corregida para tomar en cuenta los efectos de la inflación. La tasa de interés correcta puede ser calculada usando la siguiente ecuación 4:

$$i' = i + f + i * f$$

donde:

*i*: es el interés o tasa de descuento

*f*: es la tasa de inflación

El proceso de ACCV puede ser eficientemente llevado con el uso de fichas técnicas y programas personalizados para este propósito. Actualmente existen software especializados para el análisis de costo del ciclo de vida para puentes. Un ejemplo, es el programa para Windows BridgeLCC <sup>4</sup>. Este programa es capaz de realizar análisis de sensibilidad y simulaciones Monte Carlo. Además existen otros programas que se están desarrollando actualmente. También existe el programa Life 365 para estructuras de concreto reforzado; éste fue desarrollado por un conjunto de empresas dedicadas al concreto, aditivos e investigación.

## 5.5 Costos de usuario

En la industria de la construcción, en específico de los puentes, por lo general, se tienen costos asociados con la construcción inicial del mismo y en su futuro mantenimiento y rehabilitación. Por otra parte, los costos de usuario son la mayoría de la veces ignorados cuando se evalúa el costo de varias alternativas para sistemas en puentes. Los costos de usuario son costos asociados con los retrasos de tráfico y el aumento de accidentes en zonas de trabajo. Los costos de usuario por lo general son mayores que los costos iniciales y los costos de rehabilitación y pueden influir críticamente en las decisiones.

El componente más importante en los costos de usuarios son los costos generados por el retraso del tráfico. Los retrasos en el tráfico pueden costar millones de pesos a la semana en combustible perdido y la reducción en la productividad de un gran volumen de usuarios en carreteras y áreas urbanas que están fuertemente relacionadas con el transporte terrestre. Los costos actuales del retraso están fuertemente ligados al volumen de tráfico y el tiempo de retraso. Los costos asociados con el retraso del tráfico son siempre más substanciales en carreteras de peaje, ya que desalienta a los usuarios de usar ese tramo de cobro, lo que

<sup>4</sup> Ehlen, Mark A., "BridgeLCC 1.0 Users Manual". Washington, DC: National Institute of Standards and Technology, 1999.

significa una reducción en los ingresos generales. Los costos del retraso del tráfico pueden ser calculados con la siguiente fórmula %:

$$\text{Costo de Retraso de Tráfico} = \left( \frac{L}{S_a} - \frac{L}{S_n} \right) * ADT * N * (w + r)$$

donde:

L: es la longitud afectada del camino

$S_a$ : es la velocidad del tráfico durante los trabajos de reparación del puente

$S_n$ : es la velocidad normal del tráfico

ADT: es el promedio diario de tráfico

N: es la duración de los trabajos de reparación del puente

w: es el valor promedio horario de los conductores

r: es el costo de operación promedio horario

El segundo componente de los costos de usuario son los costos por accidente. Es un hecho que en una carretera y la construcción de un puente y rehabilitación se llegue a un incremento en las tasas de accidentes en las carreteras debido a los trabajos realizados. El cálculo de los costos asociados con este incremento de las tasas de accidentes consiste en la calificación de la tasa normal de accidentes, tasa de accidentes debido a los trabajos de mantenimiento, costo promedio por accidente y longitud afectada en la carretera. La fórmula para calcular estos costos es la siguiente %:

$$\text{Costos de Accidentes} = (A_a - A_n) * L * ADT * N * c_a$$

donde:

$A_n$ : es la tasa de accidentes normales (accidentes/ millas vehículo)

$A_a$ : es la tasa de accidentes debido al trabajo de mantenimiento (accidentes/ millas vehículo)

L: es la longitud afectada de la carretera (millas)

$C_a$ : es el costo promedio por accidente

La gran mayoría de variables en el análisis de costo del ciclo de vida son especificadas en el sitio. Por ejemplo, los precios unitarios para costos de construcción varían dependiendo el área de la República Mexicana y qué tan deteriorado esté el puente que dependen de la localización geográfica del sitio y de las prácticas de construcción utilizadas. A continuación se presentan las variables con el propósito de explicar a la variable por sí misma y dar un ejemplo de los valores que han sido utilizados en proyectos en Estados Unidos.

---

\* Ehlen, Mark A. and Marshall, Harold E., "The Economics of New-Technology Materials: A Case Study of FRP Bridge Decking". Washington, DC: National Institute of Standards and Technology, July 1996.

## 5.6 Variables del Costo de Vida

---

### 5.6.1 Periodo de Análisis

El periodo de análisis usualmente representa la vida de la alternativa. En el caso de la estructura del puente, por ejemplo, las Especificaciones de Diseño para Puentes de la AASHTO<sup>7</sup> especifica un diseño para 75 años.

### 5.6.2 Tasa de Interés

La tasa de interés es la tasa de interés asociada a la inversión inicial a través del periodo de análisis. En el caso de los programas federales de las Oficinas de Administración de Estados Unidos<sup>8</sup> se especifica una tasa de interés del 5.0 % para los análisis desarrollados en 1999. Esta tasa se basa en las notas de la Tesorería de Estados Unidos y tiene un vencimiento de 30 años.

### 5.6.3 Tasa de Inflación

La tasa de inflación es la tasa de inflación por año para el periodo de análisis usado. En una circular de las Oficinas de Administración de Estados Unidos<sup>8</sup> se indica una tasa de inflación del 2.1%; en México se deberá tener el valor obtenido del Índice Nacional de Precios Y Cotizaciones que emite la Secretaría de Economía.

### 5.6.4 Costos Unitarios de Construcción y Rehabilitación

Estos costos representan los precios unitarios típicos asociados con los costos principales como parte de la construcción inicial de un puente y subsecuentemente del mantenimiento y rehabilitación. Muchas agencias de transportación actualizan estos costos unitarios para sus proyectos y dan información estadística para el pago de cada construcción cada año.

### 5.6.5 Ámbito y Frecuencia de la Rehabilitación

Los requerimientos de tipos y materiales de un puente en particular son calificados en base a la experiencia o en la información que mantienen las agencias de transporte. El ámbito de la rehabilitación puede ser dividida en mayor y menor que son asignadas por una frecuencia específica de ocurrencia. Por ejemplo, una plataforma de concreto reforzado colada en sitio

---

<sup>7</sup> AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2nd Edition, 1998.  
<sup>8</sup> U.S. Office of Management and Budget Circular A-94, Guidelines and Discount Rates for Benefit-Cost Analysis of Federal Programs, 1999.

localizada en un clima frío puede requerir de rehabilitación menor que consiste en bachear y reencarpetar cada 10 o 15 años, mientras que la rehabilitación mayor para la misma plataforma consiste en reemplazarla totalmente cada 30 o 40 años.

#### 5.6.6 Costos de Retraso al Conductor

Los costos de retraso al conductor representan los costos asociados con el combustible gastado y el tiempo perdido o la reducción de la productividad causados por los retrasos en el tráfico. Caltrans<sup>9</sup> usa valores de usd \$ 10.73 / hora para el valor de retraso del conductor y de usd \$8.85 /hora para el costo de operación del vehículo.

#### 5.6.7 Tasa Normal de Accidentes

La tasa normal de accidentes es la tasa cuando ocurren accidentes fuera del tramo de trabajo. Caltrans utiliza un valor de 1.90 accidentes por millón – vehículo – milla.

#### 5.6.8 Tasa de Accidentes en Carretera

La tasa de accidentes en carretera es la tasa cuando ocurren accidentes en el tramo de los trabajos. Caltrans usa un valor de 2.20 accidentes por millón – vehículo – milla.

#### 5.6.9 Costo por Accidente

Este valor representa el costo promedio por accidente. Caltrans utiliza el valor de usd \$ 104, 000 por accidente.

Los Departamentos de Transporte operan bajo la consigna de presupuestos anuales que no necesariamente propicia la inversión de más dinero hoy en día para ahorrar dinero por encima del ciclo de vida de la inversión. De cualquier forma, mientras los viajeros se vuelvan más sensitivos a los impactos en el tráfico causados por la construcción o mantenimiento, esta industria está marcando cambios fundamentales basados en la decisión del ciclo de vida. Los costos asociados con una construcción inicial larga y una futura rehabilitación tienen mayor impacto hacia los usuarios viajeros y transportistas que los retrasos se tienen asociados los usuarios a una inadecuada capacidad del tráfico, es decir, le cuesta más al usuario una construcción inicial que tarde mucho tiempo que una mala planeación o carriles insuficientes de un puente.

En Estados Unidos la Administración Federal de Carreteras reconoce la necesidad de tomar en cuenta el ciclo de vida basado en la toma de decisiones como se muestra en el Acuerdo Interno LCCA<sup>10</sup>. Este documento especifica que aumenta el reconocimiento de los costos

---

<sup>9</sup> Caltrans, DOT – Transportation Economics, *Life-Cycle Benefit/Cost Analysis (Highway Projects)*, 1995

<sup>10</sup> LCCA *Interim Policy Statement*. Washington, DC: Federal Highway Administration [FHWA Docket No. 94-15], 1994.

totales del ciclo de vida de una carretera y de una inversión de infraestructura para el transporte y debe tener una mayor consideración en todas las fases de los programas carreteros.

La toma de decisión de hacer un análisis de costo del ciclo de vida necesitará ser estandarizado y aceptado para evaluar las ventajas de materiales de construcción innovadores y métodos que probablemente sean más costosos al inicio pero que ofrecen ventajas en costo a largo plazo. El análisis de costo del ciclo de vida ofrece información necesaria para tomar decisiones lógicas y acertadas para la mejor inversión del presupuesto gubernamental. Los números finales arrojados de este análisis no sólo son importantes si no que nos dan un procedimiento de evaluación racional.

Por otra parte, el costo de las barras FRP es de usd \$3 a usd \$4 por libra (incluyendo usd \$1 del material principal) en el caso de FRPV y en FRPC es usualmente más cara en comparación de las barras de acero recubiertas con epóxico que su costo aproximado es de usd \$.032 por libra<sup>11</sup>.

A continuación se muestran los precios de las fibras con algunas de sus propiedades físicas, para poder seleccionar el costo en base al precio del fabricante y darnos una idea del mercado de las fibras.

| Tipo de Fibra  | Densidad de la Fibra (kg/m <sup>3</sup> ) | Esfuerzo a Tensión de la Fibra (GPa) | Módulo a Tensión de la Fibra (GPa) | Deformación (%) | Precio Típico por libra (\$ usd) |
|----------------|-------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| <b>Vidrio</b>  |                                           |                                      |                                    |                 |                                  |
| A-Vidrio       | 2463.5                                    | 3.3                                  | 689.5                              | 4.8             | .65 - .90                        |
| C-Vidrio       | 2546.5                                    | 3.3                                  | 689.5                              | 4.8             | .75 - 1.00                       |
| E-Vidrio       | 2601.9                                    | 3.45                                 | 758.4                              | 4.76            | .75 - 1.00                       |
| S-2 Vidrio     | 2491.2                                    | 4.82                                 | 965.3                              | 5.15            | 6.00 - 8.00                      |
| <b>Carbono</b> |                                           |                                      |                                    |                 |                                  |
| Hilo Pesado    | 1743.8                                    | 3.62                                 | 2275.3                             | 1.59            | 9.00 - 12.00                     |
| Hilo Medio     | 1799.2                                    | 5.1                                  | 2413.2                             | 2.11            | 15.00 - 20.00                    |
| Hilo Bajo      | 1799.2                                    | 6.2                                  | 2964.8                             | 2.09            | 40.00 - 70.00                    |
| <b>Aramida</b> |                                           |                                      |                                    |                 |                                  |
| Kev29          | 1439.4                                    | 3.62                                 | 413.7                              | 8.75            | 12.00 - 14.00                    |
| Kev149         | 1467.0                                    | 3.48                                 | 1861.6                             | 1.86            | 25.00 - 30.00                    |

Tabla 5.1 Precio de las fibras

Fuente: Owens Corning, 2001

<sup>11</sup> Gremel, D. "FRP Rebar - A State of the Industry Report Manufacturing, Construction, Economics and Marketing", Proceedings of the Workshop Composites in Construction: A Reality, 20-21 Jul., 2001, Anacapri, Italy

## 5.7 Ejemplo del Método del Costo del Ciclo de Vida

A continuación se desarrolla un ejemplo del método de costos del ciclo de vida de una plataforma de compuestos FRP para un puente. El ejemplo completo de este nuevo material es un caso de estudio reciente de una comparación de plataformas de puentes entre compuestos FRP y las convencionales de concreto reforzado<sup>12</sup>.

El estudio de caso típico de una estructura era un puente de concreto de dos carriles y con dos claros en Carolina del Norte. Este puente estaba construido con una plataforma convencional de concreto reforzado de 210 kg/cm<sup>2</sup>. Siguiendo los pasos del método, el "proyecto" fue definido como la construcción, mantenimiento y el eventual deshabilitamiento de la plataforma. Los requisitos de comportamiento de los materiales para la plataforma fueron que (1) la plataforma debía soportar las cargas de diseño de acuerdo a los reglamentos; (2) las deflexiones entre los claros no debían exceder una cantidad máxima; y (3) debía durar 40 años. Se escogieron tres tipos de materiales FRP como alternativa del concreto reforzado.

El costo de construir, reparar y como se mencionó antes el eventual deshabilitamiento de las alternativas de plataformas, fueron compiladas usando el esquema de clasificación de costos y se recibieron costos estimados de los ingenieros estructurales, ingenieros de transporte y personal de mantenimiento del Departamento de Transporte de Carolina del Norte así como de los contratistas. Los costos de los compuestos FRP fueron obtenidos de los diseñadores de FRP, fabricantes y de los proyectos que actualmente llevaban a cabo con FRP, así como de investigaciones de las universidades. Dos de los diseños de plataformas FRP no tuvieron la suficiente resistencia para soportar las deflexiones entre los claros. El peralte de las vigas del puente fue aumentado para soportar la reducción de resistencia del puente y se colocó una carga adicional en el costo de instalación de la plataforma para pagar las vigas más largas.

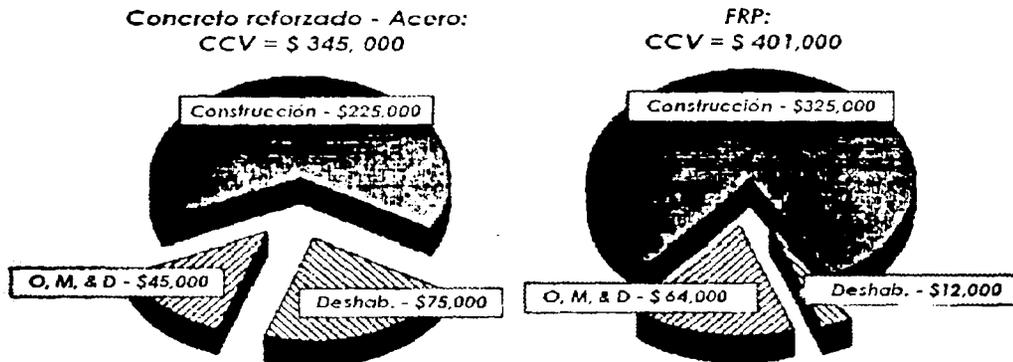


Figura 5.3 Costo del Ciclo de Vida por Categoría de Ciclo de Vida \*

<sup>12</sup> Ejemplo tomado de: Ehlen, Mark A. and Marshall, Harold E., "The Economics of New-Technology Materials: A Case Study of FRP Bridge Decking". Washington, DC: National Institute of Standards and Technology, July 1996.

## 5.7 Ejemplo del Metodo del Costo del Ciclo de Vida

Al estudiar los costos de desarrollo de un producto, los ingenieros a menudo tienen que dividir el ciclo de vida de una particular en tres etapas: desarrollo, producción y operación. Los costos de desarrollo se refieren a los costos de ingeniería y de diseño que se incurren durante el desarrollo del producto. Los costos de producción se refieren a los costos de fabricación que se incurren durante la producción del producto. Los costos de operación se refieren a los costos de mantenimiento que se incurren durante la operación del producto.

El ciclo de vida de un producto se divide en tres etapas: desarrollo, producción y operación. Los costos de desarrollo se refieren a los costos de ingeniería y de diseño que se incurren durante el desarrollo del producto. Los costos de producción se refieren a los costos de fabricación que se incurren durante la producción del producto. Los costos de operación se refieren a los costos de mantenimiento que se incurren durante la operación del producto. El ciclo de vida de un producto se divide en tres etapas: desarrollo, producción y operación. Los costos de desarrollo se refieren a los costos de ingeniería y de diseño que se incurren durante el desarrollo del producto. Los costos de producción se refieren a los costos de fabricación que se incurren durante la producción del producto. Los costos de operación se refieren a los costos de mantenimiento que se incurren durante la operación del producto.

El ciclo de vida de un producto se divide en tres etapas: desarrollo, producción y operación. Los costos de desarrollo se refieren a los costos de ingeniería y de diseño que se incurren durante el desarrollo del producto. Los costos de producción se refieren a los costos de fabricación que se incurren durante la producción del producto. Los costos de operación se refieren a los costos de mantenimiento que se incurren durante la operación del producto. El ciclo de vida de un producto se divide en tres etapas: desarrollo, producción y operación. Los costos de desarrollo se refieren a los costos de ingeniería y de diseño que se incurren durante el desarrollo del producto. Los costos de producción se refieren a los costos de fabricación que se incurren durante la producción del producto. Los costos de operación se refieren a los costos de mantenimiento que se incurren durante la operación del producto.



Figura 5.7. Ejemplo del método del costo del ciclo de vida.

El ciclo de vida de un producto se divide en tres etapas: desarrollo, producción y operación. Los costos de desarrollo se refieren a los costos de ingeniería y de diseño que se incurren durante el desarrollo del producto. Los costos de producción se refieren a los costos de fabricación que se incurren durante la producción del producto. Los costos de operación se refieren a los costos de mantenimiento que se incurren durante la operación del producto.

En las figuras 5.3 a 5.5 se compara el costo del ciclo de vida de la plataforma de concreto reforzado y una de las tres plataformas FRP utilizando el esquema de clasificación. Las gráficas de los compuestos FRP en cada figura muestran los costos de prueba, diseño e inspección de la plataforma FRP (por ejemplo, los costos de introducción de la nueva tecnología). De la figura 5.3 podemos observar que mientras la plataforma FRP tiene un mayor costo de construcción (usd \$325,000) que la de concreto reforzado (usd \$ 225,000), su costo de deshabilitamiento es menor partiendo de la premisa que puede ser rápidamente desarmado y manualmente. Los costos OM & D de los FRP son mayores que los costos de las plataformas de concreto debido principalmente al monto del costo de introducción de nuevas tecnologías que se cargan al constructor y al usuario (por ejemplo, la evaluación no destructiva de la nueva plataforma). La figura 5.4 nos muestra cómo la plataforma FRP da menos carga a los usuarios de las carreteras que las medidas por los costos de usuario en plataformas con concreto reforzado, debido a los retrasos de tráfico, costos de operación del vehículo y los accidentes que se espera aumenten. Esta carga es debida directamente a un mayor tiempo requerido a los trabajos de una plataforma de concreto. Mientras que el costo a los usuarios durante los trabajos en la plataforma de concreto son de usd \$ 79,000, el costo a los usuarios durante los trabajos de la plataforma FRP son de usd \$58,000.

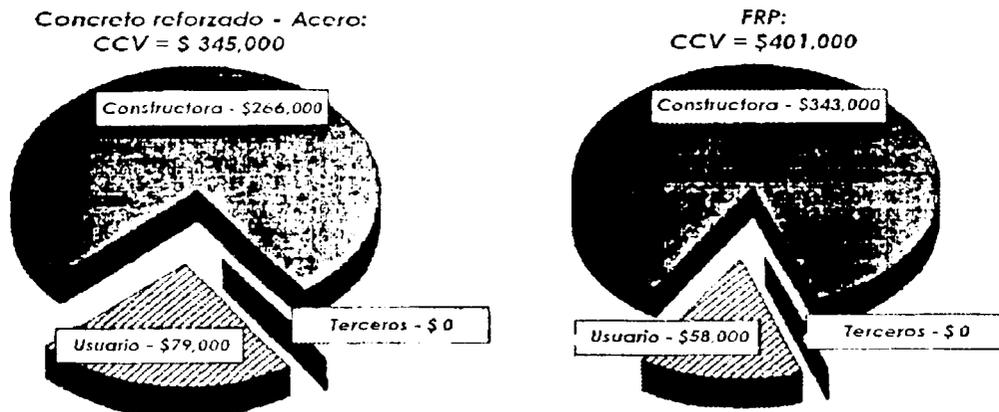
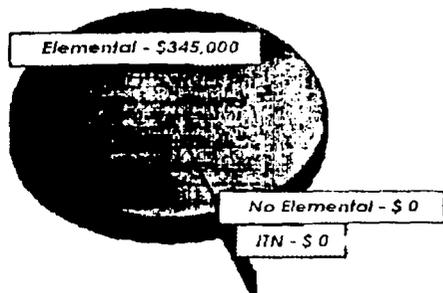


Figura 5.4 Costo del Ciclo de Vida por Categorías de Costo Soportado

Adicionalmente, para describir qué componentes de proyecto son los generadores de costos, la figura 5.5 ilustra los costos a corto y largo plazo de los dos materiales para la plataforma. En el corto plazo, el costo de introducción de nueva tecnología de la plataforma FRP es de usd \$86,000, lo que hace a la plataforma de concreto el material con el costo más efectivo de ciclo de vida. Pero, si la plataforma de FRP se aceptara y sus costos de introducción se disiparan, su costo de ciclo de vida a largo plazo es (usd \$401,000 - usd \$86,000) = usd \$315,000, haciendo a la plataforma FRP la de un costo más efectivo en sus ciclo de vida (este paso es anterior al análisis de sensibilidad, el cual no se detallará en este caso).

**Concreto reforzado - Acero:**  
CCV = \$345,000



**FRP:**  
CCV = \$401,000

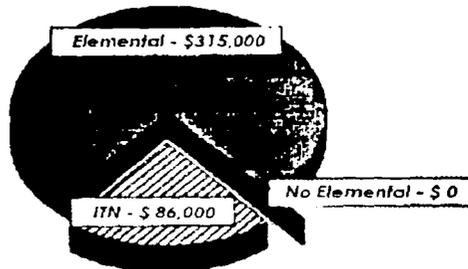


Figura 5.5 Costo del Ciclo de Vida por Elementos de Proyecto\*

\* Fuente: Life Cycle Costs of New Materials, Journal of Infrastructure Systems, 1997

Se debe notar que en las Figuras 5.3 y 5.4 se incluyen los costos de introducción de nueva tecnología en el corto plazo. La versión del largo plazo de estas dos figuras pueden ser dibujadas excluyendo estos costos de los totales.

Como parte de todo lo visto anteriormente en este capítulo podemos concluir que hay materiales nuevos que están siendo desarrollados y que bien pueden ser técnicamente iguales o superiores a los materiales convencionales. Los análisis económicos son necesarios para determinar si estos materiales, como los compuestos FRP, son efectivos en costo de ciclo de vida.

El método visto no prescribe un material particular, sin embargo, permite al diseñador elegir cualquier material que satisfaga los requerimientos técnicos y dimensionales del proyecto. La clasificación de costos asegura que todas las actividades relacionadas con el proyecto son contabilizadas, incluyendo esas actividades que conllevan a un nuevo material a su uso principal.

# RECOMENDACIONES DE DISEÑO

## 6.1 Filosofía Fundamental de Diseño

---

El desarrollo de las ecuaciones de diseño propuestas y los ejemplos desarrollados hasta ahora muestran que el diseño de estructuras de concreto con FRP está bien adelantado. De hecho, con excepción de las pruebas de compresión en barras FRPV y los estudios sobre cables Parafil en Inglaterra<sup>1</sup>, los diseños se pueden hacer usando conceptos básicos de mecánica estructural en lugar de formalizar ecuaciones de diseño.

Para el análisis a flexión, los principios fundamentales incluyen equilibrio de la sección transversal, compatibilidad de deformaciones, uso de las secciones planas y el comportamiento de los materiales. Para el concreto, el modelo de comportamiento constitutivo utiliza el bloque rectangular de esfuerzos de Whitney para hacer una aproximación de la distribución de esfuerzos en el concreto en condiciones de carga. Para el refuerzo FRP, se debe utilizar una relación lineal esfuerzo – deformación a la falla. Este modelo es adecuado para elementos donde el refuerzo FRP está a tensión. Sin embargo, se necesita mayor investigación para el uso de FRP en zonas de compresión debido a un posible pandeo de las fibras individuales en la barra de refuerzo.

La filosofía de diseño para el refuerzo de elementos de concreto con placas FRP externas utiliza las mismas suposiciones. En este caso, se debe poner mucha atención en los esfuerzos cortantes que existe entre la placa y el concreto, así como en las terminaciones de las placas.

---

<sup>1</sup> Kingston, D., "Parallel Fibre Ropes", Les Matériaux Nouveaux pour la Précontrainte et la Renforcement d'ouvrages d'art, 1998; Burgoyne, C.J., "Symposium on Engineering Applications of Parafil Ropes", Department of Civil Engineering, Imperial College of Science and Technology, 1988.

Hasta ahora, existe muy poca investigación en el uso de FRP como refuerzo para cortante, como en los estribos. La escasa literatura parece sugerir que debido a un menor módulo de elasticidad del refuerzo a cortante FRP es posible que las grietas por cortante se abran más que las fisuras en elementos con acero transversal. Se espera una reducción en la resistencia a cortante a partir de que la contribución del concreto también es reducida ya que el tamaño de las grietas aumentaría.

El uso de materiales FRP como refuerzo longitudinal de vigas de concreto requiere de un desarrollo de procedimientos de diseño que asegure la capacidad de la estructura. Con refuerzo de acero se alcanza un nivel de seguridad si la cuantía de refuerzo a flexión es al menos 24 % menor que la balanceada. Esto asegura que las barras de acero longitudinales fluirán antes de que el concreto se aplaste, es decir, garantiza una falla dúctil. El resultado es una viga que a la falla tiene capacidad de absorber grandes cantidades de energía a través de la deformación plástica del acero. Los materiales FRP responden de una manera lineal y elástica hasta la falla, en donde la ruptura ocurre de una manera repentina. Como resultado, la falla, sea resultado del cortante, compresión por flexión o tensión por flexión, es inevitable y repentina. Los reglamentos de construcción y las especificaciones de diseño eventualmente reconozcan las ventajas y desventajas de los materiales FRP cuando definen procedimientos analíticos en los cuales los ingenieros dependerán del diseño. Esto podría requerir de una reducción de los factores de resistencia a flexión de modo de reconocer las características mecánicas de los materiales FRP.

---

## 6.2 Comportamiento Constitutivo y Propiedades de los Materiales

---

En el Capítulo 2 se muestran las propiedades de los materiales para refuerzos FRP. La variación del contenido de fibra y el control de calidad del fabricante pueden afectar la resistencia y el módulo de elasticidad, por lo cual el diseñador debe verificar las propiedades del material que está siendo usado. El esfuerzo último de tensión de un refuerzo FRP debe considerar la variación estadística del producto. Algunos investigadores sugieren que el esfuerzo máximo sea tomado como el esfuerzo promedio menos tres desviaciones estándar. Esto supone que debe existir información estadística y esta debe ser representativa de lotes de producción de FRP.

El uso del bloque equivalente de esfuerzos de Whitney es adecuado para la determinación del comportamiento de los esfuerzos en el concreto, no obstante, muchos investigadores han usado reglas constitutivas más complejas para los esfuerzos del concreto contra deformación pero con resultados muy similares aquéllos en los cuales se ha cesado el bloque equivalente.

Las propiedades de un material específico determinan muchas de las consideraciones de diseño. Primero, el módulo de elasticidad de la mayoría de los refuerzos FRP son menores que el del acero. Esto significa que las grandes deformaciones son necesarias para desarrollar un esfuerzo a tensión comparable en el refuerzo. Si comparamos resultados de los refuerzos usados

---

- Mutsuyoshi, H; Uehara, K., "Mechanical Properties and Design Method of Concrete Beams Reinforced with Carbon Fiber Reinforced Plastics", Transactions of JCI, 1992

FRP y acero, tenemos que en una viga reforzada con FRP tiene mayores deflexiones y mayor anchura en las grietas que las de una sección reforzada con acero<sup>3</sup>.

La resistencia del refuerzo FRP es dependiente del tiempo. Como un cilindro de concreto, el FRP fallará con una carga sostenida considerada menor que su resistencia estática a corto plazo. En la actualidad, muchos diseñadores e investigadores están limitando la carga constante en los refuerzos FRP a un 50 - 60% de su resistencia estática a corto plazo<sup>4</sup>. Por otro lado, otros investigadores han dado a conocer la relación lineal entre las cargas sostenidas y el logaritmo del tiempo. Con estos resultados, se recomienda una menor carga sostenida para el refuerzo FRPV en presencia de ambientes agresivos.

## 6.3 Ductilidad

---

La definición formal de ductilidad es la relación de la deformación total a la falla entre la deformación a la fluencia. Los refuerzos FRP tienen una curva esfuerzo deformación a la falla lineal. Por lo tanto, por la definición antes vista, el comportamiento de los elementos reforzados con FRP no puede ser considerado dúctil.

La edición 1995 del ACI 318 contiene un apéndice general para los factores de resistencia. En el ACI 318, 95 define la cuantía máxima de refuerzo en secciones controladas a tensión como aquella que experimenta una deformación a tensión de no menos de 0.005 al esfuerzo nominal. La deformación a tensión es medida al nivel del extremo del refuerzo a tensión bajo el esfuerzo de diseño, es decir, que incluye factores de carga. Esta consideración fue propuesta para permitir a los elementos con altas cuantías de refuerzo incluir barras de refuerzo de acero de alta resistencia y cables de acero presforzados, los cuales tienen diferentes esfuerzos de fluencia que el refuerzo ordinario. Los requisitos sobre la ductilidad de un elemento reforzado con FRP puede ser reemplazada con el concepto de sección controlada a tensión, la cual se define como la sección que tiene una deformación máxima a tensión de 0.005 o más.

Si se llegara a utilizar un modelo pseudo dúctil, el diseñador debe darse cuenta que el elemento recuperará su comportamiento elástico. Sólo un daño menor puede ocurrirle al concreto con grandes deformaciones, pero hay que recordar que no se llegará a la fluencia. En zonas sísmicas, existirá una disipación de energía resultado de estas grandes deformaciones.

---

<sup>3</sup> "State of Art of FRP Composites", Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, 2001

<sup>4</sup> Miesslerer, H.J. y Wolff, R., "Experience with Fiber Composite Materials and Monitoring with Optical Fiber Sensors", Proceedings, Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures, ASCE, 1991

## 6.4 Diseño por Cortante

---

La mayor cantidad de información existente de investigaciones es para elementos que no son críticos. Existen muy pocas pruebas con refuerzo FRP a cortante. Los resultados experimentales del anclaje a cortante indican que los estribos fallan en las esquinas debido a la falla prematura en el doblado. Las pocas pruebas que han sido realizadas con estribos FRP sugieren que la resistencia a cortante es menor que la predicha. Esto puede ser debido a las largas grietas que son resultado del bajo módulo de elasticidad de los estribos. Las grandes grietas pueden reducir la contribución de muchos elementos de concreto a la resistencia a cortante. Elementos con refuerzo FRP longitudinal y estribos de acero no reportan comportamientos inusuales. Se debe poner atención especial a la reducción de transferencia del refuerzo FRP en presencia de grietas por cortante.

El refuerzo externo adherido en forma de camisas FRP adheridos han sido aplicados a vigas con resistencia a cortante insuficiente. Estas pruebas<sup>6</sup> han indicado que este procedimiento da suficiente resistencia a cortante que permite el desarrollo pleno de la capacidad a flexión de la viga. En la sección 6.5.4 se habla un poco de las camisas como refuerzo a esfuerzo axial.

## 6.5 Refuerzo Externo Adherido

---

La compatibilidad de deformaciones entre la sección de concreto reforzado y la placa adherida, es la principal consideración por hacer para calcular la resistencia a flexión del elemento. El diseñador debe reconocer que existen tres posibles modos de falla. Estos son: falla a tensión de la placa, delaminación de la placa debido a esfuerzos cortantes elevados entre el concreto y la placa, y la falla por cortante del concreto que se encuentra inmediatamente arriba del adhesivo.

Los mejores diseños incluyen placas la cuáles han sido adheridas a todo lo largo de los elementos. Adicionalmente, el refuerzo vertical es colocado para retardar la delaminación en los extremos de las placas FRP.

### 6.5.1 Diseño de Elementos Reforzados con FRP Adheridos

#### 6.5.1.1 Comportamiento a Flexión

El diseño a flexión de elementos de concreto reforzados y presforzados con FRP procede del equilibrio básico en la sección transversal y del comportamiento constitutivo del concreto y del

---

<sup>6</sup> Rizkalla, S.H. y Tadros, G., "A Smart Highway Bridge in Canada", Concrete Internacional, junio, 1994

<sup>7</sup> Jeong, S.M.; Naaman, A. Y Tan K., "Investing of Beams Partially Prestressed Carbon Fiber Reinforced Composite Tendons", Proceedings of the FIP XII International Congress, mayo, 1994

refuerzo FRP. A diferencia del acero de refuerzo, no hay ninguna fuerza de tensión constante después del punto de fluencia. El esfuerzo en el refuerzo continúa aumentando con la deformación hasta que llega a la ruptura. La única condición conocida de fuerzas en una viga reforzada con FRP es la condición balanceada, donde el concreto falla a compresión al mismo tiempo que se llega a la ruptura del refuerzo. Esto puede ser definido con la cuantía balanceada  $\rho_{br}$  y es definida como<sup>7</sup>

$$\rho_{br} = 0.85 \beta_1 f'c / f_{pu} \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} + \epsilon_{pu} - \epsilon_{pi})$$

donde:

- $\beta_1$  define la posición del eje neutro medida desde la fibra extrema a compresión
- $f'c$  es la resistencia a compresión especificada del concreto
- $f_{pu}$  es la resistencia última a tensión del tendón
- $\epsilon_{cu}$  es la deformación última del concreto
- $\epsilon_{pu}$  es la deformación última del tendón
- $\epsilon_{pi}$  es la deformación debida al preesfuerzo, incluyendo pérdidas

Si la cuantía de refuerzo  $\rho$  es menor que  $\rho_{br}$ , la falla ocurrirá por ruptura del tendón y el concreto estará cerca de su condición última de esfuerzo. En este caso se debe determinar el lugar del centroide a compresión. Si  $\rho > \rho_{br}$ , la falla a compresión del concreto (aplastamiento) ocurrirá primero. La cuantía de refuerzo debe ser seleccionado para asegurar la formación de grietas y deformaciones considerables antes de la falla para asegurar la posibilidad de tomar precauciones.

En la actualidad no existe información suficiente para definir en forma precisa la reducción en los factores de reducción de resistencia  $\phi$  para vigas reforzadas con FRP adherido. Para vigas con  $\rho < \rho_{br}$ , un factor  $\phi$  de 0.85 puede ser aceptable en virtud de que la falla es análoga a una falla por cortante. De cualquier forma, se ha mostrado que esta condición es prácticamente inalcanzable en elementos a flexión prestrozados a partir de que la deflexión llega a excederse<sup>8</sup>. Para  $\rho > \rho_{br}$ , un factor  $\phi$  de 0.70 puede ser más apropiado a partir de la falla debida al aplastamiento del concreto a compresión. Se recomienda usar una cuantía mínima de refuerzo a flexión para poder dar una resistencia post agrietamiento más adecuada y así prevenir la falla repentina a la primera grieta.

Algunos investigadores reportaron en el reglamento ACI 318 ecuaciones de resistencia conservadoras para predecir el esfuerzo a flexión de los elementos reforzados con FRP. Si la cuantía de refuerzo es cercana a  $\rho_{br}$ , las ecuaciones del ACI siguen siendo conservadoras

<sup>7</sup> Dolan, C.W., "Kevlar Reinforced Prestressing for Bridge Decks", Third Bridge Conference, Transportation Research Board, 1991

<sup>8</sup> Nanni, A., "Flexural Behaviour and Design of RC Members Using FRP Reinforcement", Journal of Structural Engineering, ASCE, noviembre, 1993

porque existe una reserva en la capacidad a tensión del refuerzo. Las ecuaciones de esfuerzo del ACI no son válidas para  $\rho < \rho_{br}$ .

#### 6.5.1.2 Grietas por Flexión

Un agrietamiento excesivo nunca es deseable, ya que reduce la rigidez, aumenta las posibilidades de deterioro y afecta adversamente la apariencia de las vigas. Desde que el refuerzo FRP no se encuentra en las mismas situaciones de los mecanismos de corrosión que el acero, las limitaciones en el ancho de las grietas establecidas por el Comité 318 del ACI, pueden ser no aplicables. El ancho de las grietas puede depender de las características físicas de la adhesión del refuerzo y de su módulo.

#### 6.5.1.3 Deflexiones

La deflexión de los elementos reforzados con FRP puede ser mayor que los elementos reforzados con acero, debido al menor módulo de elasticidad de los FRP. Esto lleva a deformaciones mayores para alcanzar niveles de esfuerzo comparables así como un menor momento de inercia. Las limitaciones de deflexión propuestas por el ACI 318 son independientes de la resistencia del concreto y el refuerzo.

Hay tres propuestas posibles para la predicción de la deflexión en elementos FRP prefabricados. El primer método se relaciona con la determinación de la curvatura en muchas secciones a lo largo del elemento y se integra aún a lo largo del elemento. Esta es la principal propuesta y es aplicable a todos los materiales FRP. Otras dos propuestas usan el momento efectivo de inercia. Existe una propuesta opcional que utiliza las ecuaciones de deflexión del ACI.

#### 6.5.1.4 Longitud de Desarrollo

La longitud desarrollo de depende de la superficie del refuerzo FRP. Existen recomendaciones para refuerzo FRPV en chalecos helicoidales, pero estos resultados o guías no son aplicables universalmente a todos los refuerzos FRP. Por ejemplo, FiBRA<sup>TM</sup>, de Mitsui tiene una superficie deformada debido al entrelazado y el CFCC<sup>TM</sup> de Tokyo Rope tiene una superficie áspera debido a la terminación de la fibra. El cable Technora<sup>TM</sup> tiene un acabado externo helicoidal mientras que el Leadline<sup>TM</sup> de Mitsubishi tiene depresiones en la superficie del cable. Estas condiciones son bastante diferentes y nos indican que se necesita hacer más investigación y establecer guías de diseño más genéricas.

#### 6.5.1.5 Longitud de Transferencia

Actualmente no existe información amplia y suficiente acerca de la longitud de transferencia de los tendones presforzados FRP. El tendón CFCC<sup>TM</sup> de Tokyo Rope tiene una superficie que es siete veces más áspera que los cables de acero.

### 6.5.2 Consideraciones de Diseño para Rehabilitación de Estructuras de Concreto

Con la finalidad de rehabilitar estructuras de concreto, es necesario diferenciar los conceptos de reparación, refuerzo y rehabilitación ya que estos términos son, por lo general, usados erróneamente y son intercambiados, y de hecho, refieren a condiciones estructurales diferentes. En la "reparación" de una estructura, el material compuesto es usado para restituir una deficiencia estructural o de servicio, tal como, grietas. En contraste, el reforzamiento se refiere a la adición del compuesto FRP para mejorar el nivel de comportamiento existente de diseño, como podría ser, el incrementar la resistencia de un puente. El término rehabilitación, es específicamente usado para mejorar de manera sísmica las instalaciones, tal como, usando chalecos de compuestos FRP para el confinamiento de columnas. Esta diferenciación es importante no solo en la base de la funcionalidad estructural, sino también para estar familiarizado con el uso del material y su vida esperada tienen un efecto importante en la selección de la fibra – resina de varias alternativas.

#### 6.5.2.1 Refuerzo a Flexión

Se ha demostrado que la adhesión de refuerzos FRP a la superficie a tensión de un elemento de concreto sujeto a flexión aumenta la resistencia de éste en valores que van del 10 al 160 por ciento\* (para fines prácticos de diseño, es razonable suponer aumentos del 5 al 30 por ciento).

El diseño de sistemas de refuerzos FRP adheridos en miembros a flexión está basado en principios de estado límite, siendo necesario analizar la resistencia, la ductilidad y los requisitos de servicio de los componentes involucrados.

Para fines de diseño, se requiere analizar varios posibles modos de fallas y estados límite. El procedimiento de diseño descrito en este capítulo consiste en obtener un área preliminar de FRP y modificarla sobre la base de un análisis completo de la resistencia, ductilidad y capacidad de servicio de la sección. Los cálculos son necesariamente iterativos, por lo que se recomienda poner en práctica programas de computación para automatizar el proceso de iteración. Las suposiciones que se hacen son las siguientes:

- Existe una adhesión perfecta entre el FRP y el sustrato adherido.
- Las secciones planas permanecen planas (principio de Bernoulli).
- Los valores de las cargas de sitio, al momento de la instalación del FRP, están dentro de los límites elásticos de la estructura.
- Se han evaluado adecuadamente las condiciones existentes (incluyendo las áreas y propiedades del acero, resistencias del concreto, fuerzas de pretensado efectivas, etc.)

La resistencia a la ruptura de cualquier sección puede calcularse suponiendo una distribución de deformación (con un cálculo aproximado de la distancia al eje neutro), determinando el modo de falla gobernante, y verificando o revisando la suposición basada en equilibrio de

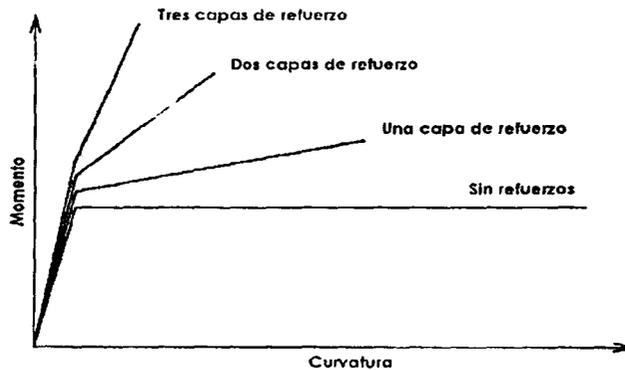
---

\* Nanni, A., "Concrete Repair with Externally Bonded FRP Reinforcement : Examples from Japan", Concrete International, junio, 1995

esfuerzos. Una vez que se determine la deformación y la distribución de esfuerzo real mediante tanteos, podrá determinarse la resistencia a momento flexionante nominal.

### 6.5.2.2 Ductilidad

El uso de FRP como medio de refuerzo a flexión afectará la ductilidad del sistema original. En la figura 6.1 se muestran las relaciones idealizadas de momento flexionante en función de la curvatura para una viga reforzada con FRP adheridos. El aumento del momento flexionante resultante logrado con las láminas de FRP resulta a expensas de la ductilidad. En muchos casos la pérdida de ductilidad es despreciable; sin embargo, es preciso analizar aquellas otras secciones que si experimentan una pérdida significativa de la misma. La metodología que se recomienda utilizar es la del ACI 318, en donde una sección con baja ductilidad debe compensarse con una reserva de resistencia mayor, la cual puede lograrse aplicando un factor de resistencia de 0.70 a secciones frágiles, en contraposición al factor 0.90 aplicado a secciones dúctiles.



**Figura 6.1** Relación típica idealizada momento flexionante – curvatura para varios grados de refuerzo (vigas de concreto armado)

Fuente: Guía de Diseño del Sistema Compuesto MBrace™, MBI, 1998

Los modos de falla por aplastamiento del concreto o ruptura del FRP antes de la fluencia del acero son ambos de tipo frágil. En el caso de fluencia del acero seguida por aplastamiento del concreto, hay cierto nivel de ductilidad dependiendo de cuánto se haya deformado el acero sobre el punto de deformación de fluencia. Para el caso de fluencia del acero seguida por ruptura del FRP, el modo de falla es significativamente mayor que la necesaria para ocasionar la fluencia del acero. Adicionalmente, el acero a tensión y la lámina de FRP están a una distancia similar al eje neutro.

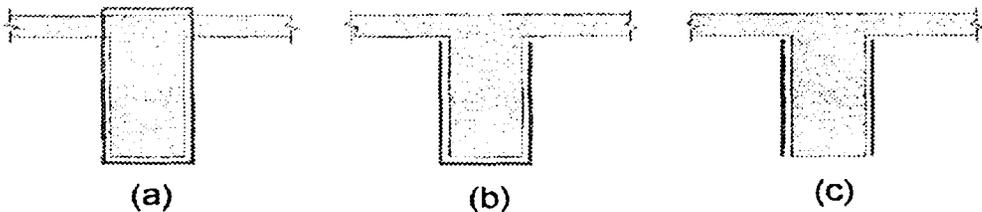
Además de los modos de falla en el estado límite, la ductilidad también es afectada por la condición de servicio. Si el acero a tensión fluye bajo niveles de carga de servicio, entonces es importante considerar tanto la ductilidad como los esfuerzos residuales. Los límites de esfuerzo de trabajo protegen contra tales circunstancias en el estado límite.

### 6.5.2.3 Refuerzo a cortante

Se ha demostrado que la resistencia al esfuerzo cortante de una viga aumenta si ésta se envuelve parcial o completamente con FRP en sentido transversal<sup>10</sup>. El aumento en resistencia dependerá de varios factores, entre los cuales se incluyen la configuración de la envoltura, la cantidad y el tipo de FRP, la resistencia del concreto original, y la naturaleza de las cargas y de las condiciones de soporte. Ahora bien, debido a que la resistencia a cortante de la viga depende significativamente de la adhesión interfacial entre el FRP y el concreto (especialmente en el caso de vigas envueltas parcialmente), el aumento de la resistencia a cortante no es necesariamente proporcional a la cantidad de FRP utilizado.

Los sistemas FRP ofrecen al ingeniero varias opciones para aumentar la resistencia al esfuerzo cortante. En general, y de una manera similar al procedimiento seguido para estribos de acero, se envuelven las fibras transversalmente alrededor de una sección de concreto a fin de reforzar grietas diagonales a tensión; a partir de esta metodología general se han diseñado e investigado varias configuraciones de refuerzo FRP a cortante<sup>11</sup>.

El método más eficaz de aplicar refuerzo a cortante con láminas FRP es envolver toda la sección transversal de la viga con FRP, tal como se muestra en la Figura 6.2 (a). Por lo general, esta configuración no es práctica desde el punto de vista constructivo; frecuentemente, la presencia de losas monolíticas u otros elementos soportados impiden colocar la lámina alrededor de la parte superior de la sección. Una opción podría ser perforar agujeros en la losa y envolver tiras o bandas alrededor de la sección, pero este método es frecuentemente complicado y costoso.



**Figura 6.2** Diferentes configuraciones de envoltura de refuerzos de FRP transversales (a) Envoltura total del FRP alrededor de la viga. (b) Envoltura en "U" del FRP. (c) Adhesión del FRP a los dos lados de la viga.

Fuente: Guía de Diseño del Sistema Compuesto MBrace™, MBT, 1998

<sup>10</sup> Chajés, M.J.; Januska, I.F. "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Applied Composite Fabrics", ACI Structural Journal, mayo – junio, 1995

<sup>11</sup> Trianafilou, I.C. " Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy – Bonded FRP Composites", ACI Structural Journal, marzo – abril, 1998

El método más común consiste en envolver los lados y la parte inferior de la sección. Esta configuración, conocida como la envoltura en letra "U", se muestra en la Figura 6.2 (b). La envoltura en letra "U" es práctica y eficaz para aumentar la resistencia al esfuerzo cortante de la sección. Sin embargo, su eficacia es alta únicamente en las regiones de momentos flexionantes positivos (con esfuerzos de tensión en la parte inferior de las vigas). En las regiones de momentos negativos, el agrietamiento por cortante se inicia desde la parte superior de la sección cerca de la losa; debido a su posición debajo de la losa, es posible que el FRP no pueda controlar la iniciación de estas grietas. Una vez que éstas se abran, existe la posibilidad de que se propaguen a través de la sección sin que el FRP ejerza efecto de refuerzo alguno.

En ciertas situaciones puede que no sea posible envolver la parte superior o la inferior de la sección. Sin embargo, es todavía posible reforzar a cortante si se coloca el refuerzo en ambos lados de la sección, tal como se muestra en la Figura 6.2. No obstante, la eficacia de esta configuración está limitada debido al deficiente anclaje de la lámina de FRP.

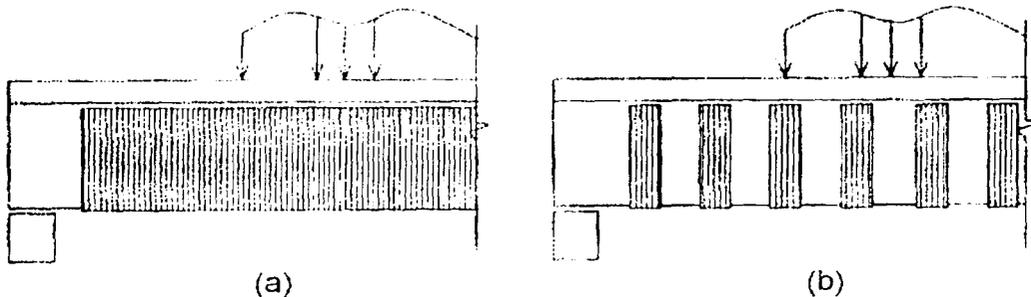


Figura 6.3 Diferentes distribuciones de refuerzo. (a) Refuerzo continuo. (b) Refuerzo colocado en forma de tiras

Fuente: Guía de Diseño del Sistema Compuesto MBrace™, MBT, 1998

Tal como se muestra en la Figura 6.3, el refuerzo de FRP transversal puede aplicarse en forma de tiras uniformemente separadas o en forma de una envoltura continua. El uso de tiras puede ser eficaz para optimizar la cantidad de material empleado; además, se va a envolver todo el largo de la viga, tal configuración puede permitir una mejor migración de la humedad a través del concreto.

Debido a que el FRP es un material anisotrópico, con alta resistencia en la dirección de las fibras, éstas pueden orientarse en la dirección que produzca un refuerzo máximo de las grietas a tensión diagonal. Tal efecto puede lograrse empleando tiras inclinadas (Figura 6.4 (a)). Sin embargo, las capas de refuerzo orientadas verticalmente son más fáciles de instalar y pueden reducir la longitud total de la envoltura (Figura 6.4 (b)).

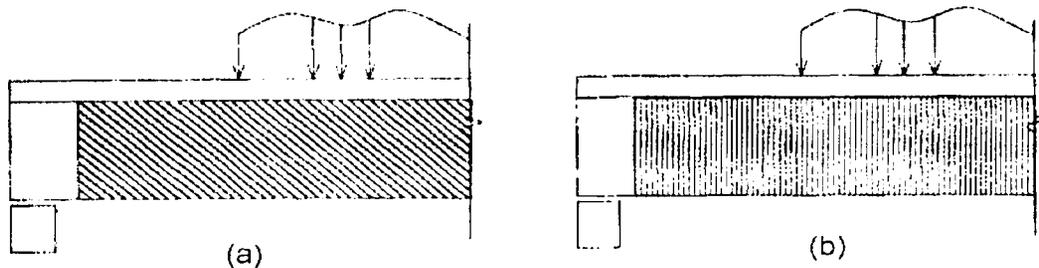


Figura 6.4 Láminas con fibras orientadas en varias direcciones primarias. (a) Envoltura de 45°. (b) Envoltura de 90°.

Fuente: Guía de Diseño del Sistema Compuesto MBrace™, MBT, 1998

Se ha demostrado que el uso de refuerzo FRP biaxial mejora el rendimiento general del sistema<sup>12</sup>. Para ello, se colocan dos capas unidireccionales de refuerzo FRP en direcciones perpendiculares (Figura 6.5). La capa en la dirección primaria suministra la mayoría del refuerzo, mientras que la que está en la dirección secundaria limita las aperturas de grietas por cortante y facilita el anclaje de la capa de dirección primaria.

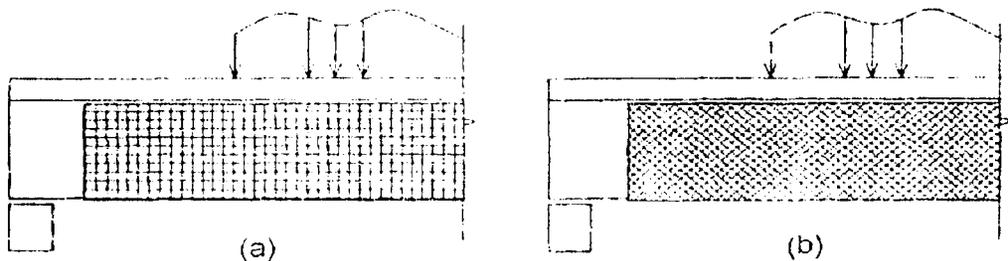


Figura 6.5 Vigas con refuerzo FRP a cortante biaxial. (a) Envoltura 0°/90°. Envoltura ±45°

Fuente: Guía de Diseño del Sistema Compuesto MBrace™, MBT, 1998

#### 6.5.2.4 Mejora del comportamiento axial

Una técnica ampliamente utilizada para mejorar el comportamiento a compresión axial de elementos de concreto es el uso de reforzamiento de FRP. Al envolverse una columna de concreto con una camisa de FRP, aumentan la resistencia a cortante, a momento flexionante y la resistencia de carga axial de la columna, y posiblemente se produzca un aumento significativo de su ductilidad. La camisa de FRP, formada por fibras de FRP orientadas en la

<sup>12</sup> Rizkalla, S., "Shear Strengthening of the Maryland Bridge Using CFRP Sheets", City of Winnipeg, julio, 1997

dirección transversal, produce un fuerte confinamiento del concreto, por consiguiente mejora en el comportamiento mecánico del mismo.

Tanto los FRP de vidrio como de carbono tienen un efecto sumamente eficaz en el comportamiento mecánico axial de las columnas de concreto. La camisa de FRP, bajo cargas de servicio normales y continuas, permanece prácticamente libre de esfuerzos, y por tal razón no se considera la posibilidad de falla por fluencia del FRP de vidrio utilizado en envoltura de columnas; sin embargo, el FRP de vidrio es más pesado y produce un aumento de resistencia menor que el producido por el de carbono.

Las investigaciones y ecuaciones citadas por la literatura existente tratan específicamente de secciones transversales circulares. Aunque se ha demostrado que la técnica también mejora el comportamiento de secciones transversales rectangulares, tales mejoras no han sido cuantificadas hasta la fecha.

A medida que el concreto es sometido a compresión uniaxial, se expande radialmente debido a las deformaciones transversales inducidas por el efecto de Poisson. A bajos niveles de deformación longitudinal, el concreto se comporta elásticamente y la deformación transversal está proporcionalmente relacionada a la deformación longitudinal mediante el coeficiente de Poisson. A un valor crítico de esfuerzo longitudinal (por lo general, 75 a 80% del  $f'_c$ ), las grietas que se forman en la pasta de concreto entre los agregados provocan grandes aumentos de la deformación transversal con aumentos relativamente pequeños del esfuerzo longitudinal. Este rápido aumento de la deformación transversal produce una expansión volumétrica igualmente rápida. Este comportamiento se muestra en la Figura 6.6<sup>13</sup>.

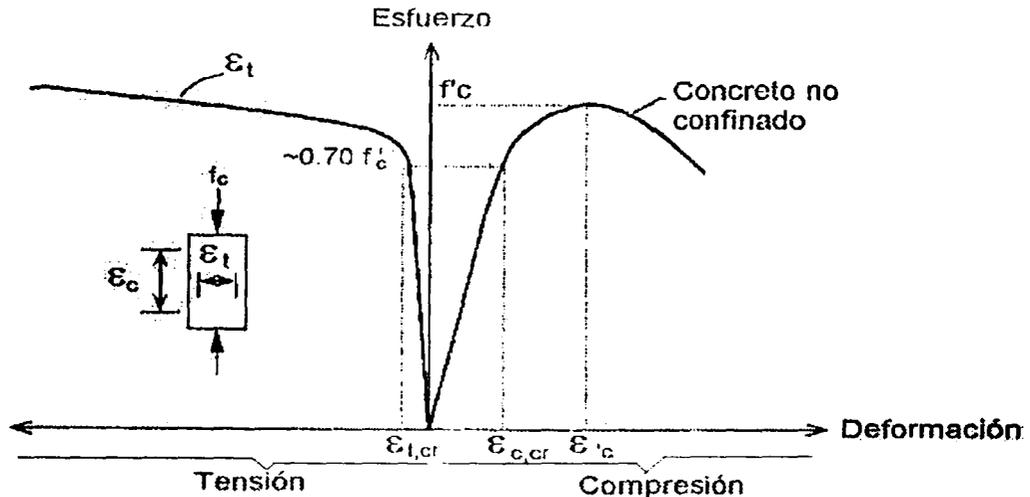
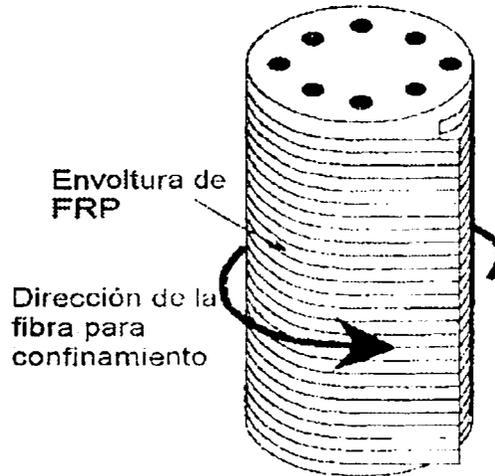


Figura 6.6 Relación típica para concreto no confinado a carga uniaxial. Se muestra el esfuerzo en función de la deformación longitudinal, transversal y volumétrica.

Fuente: Guía de Diseño del Sistema Compuesto Mfrace™, MBT, 1998

<sup>13</sup> MacGregor, J.G., "Reinforced Concrete Mechanics and Design", Prentice Hall, 1997

Las fibras del concreto envuelto con una camisa continua de FRP resisten la expansión transversal del concreto, produciéndose así una presión de confinamiento en el mismo. A bajos niveles de esfuerzo longitudinal, las deformaciones transversales son tan pequeñas que la camisa de FRP induce poco confinamiento. Esta presión induce un estado de esfuerzos triaxiales en el concreto. Se ha comprobado que el concreto sometido a esfuerzos a compresión triaxiales exhibe una resistencia superior y mayor ductilidad que el concreto sometido a compresión uniaxial<sup>13</sup>.



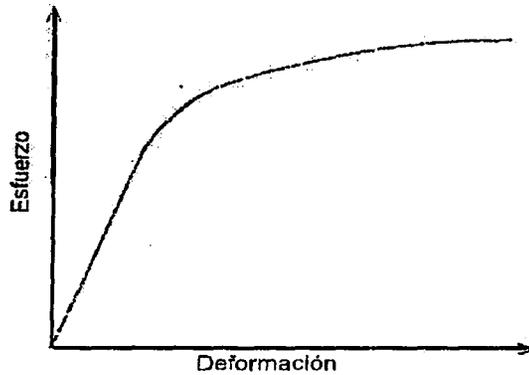
**Figura 6.7** Columna envuelta con FRP (se muestra la orientación de la fibra)

Fuente: Guía de Diseño del Sistema Compuesto MBrace™, MBT, 1998

También se ha observado que el concreto confinado por una camisa de FRP exhibe una respuesta esfuerzo – deformación bilineal<sup>14</sup>, y a partir de tal observación se ha cuantificado el mejoramiento de su comportamiento mecánico. Inicialmente, el comportamiento esfuerzo – deformación es idéntico al del concreto no confinado. Sin embargo, más allá del esfuerzo máximo para el concreto no confinado, el nivel de esfuerzos en el confinado sigue ascendiendo al aumentar la deformación, y la rapidez del aumento es aproximadamente proporcional a la rigidez de la envoltura de confinamiento<sup>15</sup>. Debido a que la camisa de FRP puede confinar las secciones dañadas del concreto, el nivel máximo de deformación útil del concreto está limitado únicamente por la deformación a ruptura alcanzable por la camisa FRP. En la Figura 6.8 se muestra el comportamiento esfuerzo deformación generalizado del concreto confinado por una camisa de FRP.

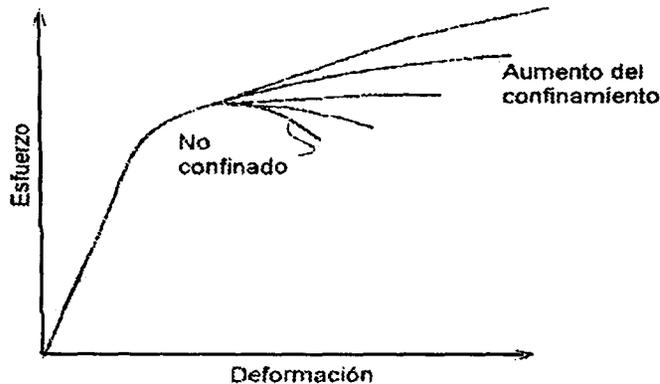
<sup>13</sup> Nanni, A. y Bradford, N., "FRP Jacketed Concrete Under Uniaxial Compression", Construction and Building Materials, septiembre, 1995

<sup>14</sup> Samaan, M. y Mirmiran, A., " Modeling of Concrete Confined by Fiber Composites ", Guía de Diseño del Sistema Compuesto MBrace™, MBT, 1998



**Figura 6.8 Relación generalizada esfuerzo – deformación para el concreto confinado por una camisa FRP**  
Fuente: Guía de Diseño del Sistema Compuesto MBrace™, MBT, 1998

Tal como se muestra en la Figura 6.9, el mejoramiento del comportamiento mecánico del concreto es proporcional al grado de confinamiento.



**Figura 6.9 Curvas esfuerzo – deformación para concreto sometido a varios niveles de confinamiento**  
Fuente: Guía de Diseño del Sistema Compuesto MBrace™, MBT, 1998

En ocasiones, es necesario realizar trabajos de reforzamiento para mejorar el comportamiento mecánico de las columnas debido a circunstancias tales como cambios en los requisitos de

carga, deficiencias de diseño o de construcción, daños físicos, corrosión u otros problemas de durabilidad, etc. Dependiendo de las circunstancias, la condición del concreto existente puede variar desde excelente hasta muy deficiente. A continuación se dan los puntos que deben contemplarse dependiendo de tales condiciones y de las razones para el reforzamiento:

- 1) Si el concreto existente está dañado y posteriormente es reparado (por inyección de epóxico, por ejemplo), el ingeniero puede considerar reducir la resistencia a compresión nominal del concreto,  $f'_c$  dependiendo de la magnitud del daño.
- 2) Si hay evidencias de corrosión activa, es necesario investigar la fuente de la corrosión y corregir el problema antes de comenzar cualquier trabajo de refuerzo. Esto es especialmente crítico, porque la camisa de FRP ocultará las evidencias visuales de corrosión.
- 3) Asimismo, es preciso estudiar y corregir cualquier otro asunto relacionado con la durabilidad, tal como la presencia de eflorescencia o exudación, cualquier forma de ataque químico, y agrietamiento no estructural.

## 6.6 Refuerzo No Adherido

El refuerzo no adherido por lo general se encuentra en aplicaciones de presforzado. Parafil es un producto comercialmente disponible el cual no usa una matriz de resina, lo cual es un indicativo de refuerzo FRP no adherido. Los tendones no adheridos requieren de un anclaje confiable. El anclaje debe desarrollar el esfuerzo último a tensión de un tendón y ser compatible para las aplicaciones de presfuerzo. Los anclajes más comunes usan epóxico para contener el tendón. El comportamiento a largo plazo de estos anclajes depende de la resina y de algunas pruebas de durabilidad. El anclaje mecánico del tendón Parafil evita el uso de epóxicos.

Si la carga sostenida en un tendón no adherido se mantiene por abajo del 60% de su resistencia última, es muy difícil crear una condición de flexión que deforme localmente el tendón de modo que alcance su resistencia última. Los factores de reducción de resistencia para elementos con tendones FRP no adheridos pueden ser similares a los de los elementos reforzados con acero con la excepción de que la confiabilidad del anclaje debe ser incluida.

### 6.6.1 Resistencia a Flexión

La resistencia a flexión de los tendones no adheridos es determinada por el esfuerzo a tensión en el tendón. Este esfuerzo se encuentra por la integración del cambio de deformación a lo largo de la viga. El cambio de deformación es una función del peralte de la viga, la carga y la excentricidad del tendón. Para elementos con una relación claro – peralte mayor que 30, se dice que virtualmente no aumenta su esfuerzo efectivo de presfuerzo. Esto sucede porque el incremento en la deformación es pequeño y el módulo de elasticidad del tendón FRP es menor

que el del acero. Para los elementos con relaciones claro – peralte menores que 30, la integración básica es requerida.

Las ecuaciones dadas en el ACI 318 para los tendones de acero no adheridos son derivadas de los resultados obtenidos de la información disponible. Cuando el módulo de elasticidad del tendón FRP es menor que el del acero, se usa las ecuaciones del ACI 318 para predecir el aumento de esfuerzo en los tendones FRP. De cualquier forma la fórmula desarrollada por Naaman<sup>16</sup>, que es más compleja que la del ACI, puede ser aplicable para los tendones FRP no adheridos.

### *6.6.2 Deflexiones*

Las deflexiones de una sección de concreto reforzado sin grietas con tendones FRP no adheridos pueden ser calculadas usando las recomendaciones del ACI 318. Una vez que se agrieta la sección, el elemento va a tener un mayor número de grietas grandes.

La falta de compatibilidad de deformaciones con la sección impide una determinación exacta de la deflexión del elemento.

---

## **6.7 Barras FRP**

---

### *6.7.1 Consideraciones Generales*

Las recomendaciones generales para el diseño a flexión de elementos de concreto reforzado con barras FRP están basadas en los principios de equilibrio, compatibilidad y las leyes constitutivas de los materiales. Además, el comportamiento susceptible que tiene tanto el refuerzo FRP como el concreto da lugar a tener la ruptura del FRP o el aplastamiento del concreto como mecanismos que controlan la falla.

### *6.7.2 Filosofía de Diseño*

Tanto el trabajo bajo carga como la resistencia son considerados por el Comité 440 del ACI. Este ha optado por empezar con un diseño de esfuerzo de los elementos de concreto reforzado con barras FRP para asegurar la compatibilidad con otros documentos del ACI. En particular, todas estas recomendaciones hacen referencia al Reglamento de Construcción ACI 318-95, en

---

<sup>16</sup> Naaman, A. ; Tan, K. ; Jeong, S., "Partially Prestressed Beams with Carbon Fiber Composite Strands Preliminary Tests Evaluation", Fiber – Reinforcement – Plastic of Concrete Structures Proceedings of the ACI International Symposium, marzo, 1991

el cuál también en general esta basado el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal<sup>17</sup>, lo que se podría adecuar a nuestros reglamentos. Estas recomendaciones son basadas en los principios de diseño como los estados limite en el cual el elemento de concreto reforzado FRP es diseñado en base a sus requerimientos de esfuerzo y después es verificado por resistencia a la fatiga, resistencia al rompimiento por fluencia y criterios de servicio. En muchas maneras, los limites en los criterios de servicio, fatiga o fluencia pueden controlar el diseño de los elementos de concreto reforzado por flexión con barras FRP (especialmente FRP de aramida y vidrio, ya que manifiestan baja rigidez).

Los factores de carga dados en el ACI 318 son usados para determinar la resistencia requerida en un elemento de concreto reforzado.

### 6.7.3 Diseño con las propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales dadas por los fabricantes, tales como la resistencia garantizada a la tensión, deben ser consideradas como una de las propiedades iniciales que no incluye los efectos de una exposición prolongada al ambiente. Esto es, porque la exposición prolongada a varios tipos de clima puede reducir la resistencia a tensión, así como la resistencia a la fatiga y al rompimiento por fluencia de las barras FRP. En las ecuaciones de diseño se deben usar las propiedades del material reducidas debido al nivel de exposición del ambiente.

Las ecuaciones siguientes se deben utilizar para determinar la capacidad a tensión. El diseño de resistencia a tensión está determinado por:

$$f_{fu} = C_E f^*_{fu}$$

donde:

$f_{fu}$  = Esfuerzo a tensión de diseño del FRP, considerando las reducciones ambientales

$C_E$  = Factor de reducción ambiental, dados en la Tabla 6.1 para varios tipos de fibra y exposición

$f^*_{fu}$  = Esfuerzo a tensión garantizado de una barra de FRP definida como la media de las pruebas de especimenes menos tres veces la desviación estándar ( $f^*_{fu} = f^*_{fu, promedio} - 3\sigma$ ), psi.

El diseño de ruptura por deformación puede ser obtenido a través de:

$$\epsilon_{fu} = C_E \epsilon^*_{fu}$$

donde:

$\epsilon_{fu}$  = Deformación de ruptura de diseño del refuerzo FRP;

<sup>17</sup> Apuntes de la Clase de Mecánica de Materiales II, Prof. Roberto Miranda, FI UNAM 2000

$\epsilon^*_{fu}$  = Deformación de ruptura garantizada del FRP dada por la deformación a tensión media en la falla de especímenes de prueba probados menos tres veces la desviación estándar ( $\epsilon^*_{fu} = \epsilon_{fu, promedio} - 3\sigma$ ).

El módulo de elasticidad de diseño será el mismo que sea reportado por el fabricante.

Los factores de reducción ambiental dados en la tabla 6.1 son estimaciones conservadoras dependientes de la durabilidad de cada tipo de fibra y esta basado en un consenso del Comité 440 del ACI. Los efectos de la temperatura son incluidos en los valores de  $C_E$ . Las barras FRP no deben ser usadas en ambientes con una temperatura de servicio mayor que la  $T_g$  de la resina usada en su fabricación. Se puede esperar que con una investigación continua, estos valores llegaran a reflejar más los efectos actuales del ambiente.

Tabla 6.1 Factor de Reducción Ambiental por tipos de fibra y condición de exposición

| Condición de Exposición                  | Tipo de Fibra | Factor de Reducción Ambiental $C_E$ |
|------------------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| Concreto no expuesto a la tierra y clima | Carbono       | 1                                   |
|                                          | Vidrio        | 0.8                                 |
|                                          | Aramida       | 0.9                                 |
| Concreto expuesto a la tierra y clima    | Carbono       | 0.9                                 |
|                                          | Vidrio        | 0.7                                 |
|                                          | Aramida       | 0.8                                 |

Fuente: Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 2001

El diseño del esfuerzo a tensión de las barras FRP en la zona de doblez puede ser determinado por:

$$f_{fb} = \left(0.005 * \left(\frac{r_b}{d_b}\right) + 0.3\right) f_{fu} \leq f_{fu}$$

donde:

$f_{fb}$  = esfuerzo de tensión de diseño del doblez de la barra FRP;

$r_b$  = radio del doblez;

$d_b$  = diámetro de la barra de refuerzo, y

$f_{fu}$  = esfuerzo a tensión de la barra FRP

La ecuación anterior fue adaptada de las recomendaciones de diseño de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles. Para una determinación alternativa de la reducción de resistencia a tensión de la barra debido al doblez, los fabricantes deben proveer resultados de pruebas hechas de acuerdo con la reglamentación vigente.

### 6.7.4 Flexión

El diseño a flexión de los elementos de concreto reforzado con FRP es análogo al diseño de los elementos de concreto reforzado con acero. La información experimental de elementos de concreto reforzado con barras de FRP muestra que la resistencia a flexión puede ser calculada con base en suposiciones similares a aquéllas hechas para los elementos reforzados con barras de acero<sup>18</sup>. En el diseño de elementos reforzados con barras FRP se debe tomar en cuenta el comportamiento mecánico de los materiales FRP.

#### 6.7.4.1 Consideraciones Generales

Las recomendaciones dadas en este inciso son sólo para secciones rectangulares, como resultado del trabajo que se ha hecho exclusivamente para elementos con esta forma. Los conceptos descritos aquí, pueden ser aplicados al diseño y análisis de elementos con diferentes geometrías y muchos tipos de FRP, capas múltiples de FRP o ambas.

Las secciones de concreto reforzado con acero son comúnmente subreforzadas para asegurar la fluencia del acero antes de que el concreto falle. La fluencia del acero nos da ductilidad y permitir tomar medidas de precaución ante la falla del elemento. El comportamiento no dúctil del refuerzo FRP necesita una reconsideración en este rubro.

Si en el refuerzo FRP ocurre su ruptura, la falla del elemento será repentina y catastrófica. Debe existir una precaución límite de una inminente falla en forma de un amplio agrietamiento y una gran deflexión debido al alargamiento significativo que el refuerzo FRP experimente antes de la ruptura.

El modo de falla del concreto es marginalmente más deseable para elementos a flexión reforzados con barras FRP<sup>19</sup>. Debido a la experiencia que se tiene en la falla del concreto, un elemento a flexión muestra algún comportamiento plástico antes de la falla.

En conclusión, ambos modos de falla (ruptura del FRP y falla del concreto) son aceptables en el diseño de elementos a flexión reforzados con barras FRP que den resistencia y servicio satisfactorios. Para compensar la carencia de ductilidad, el elemento debe tener una reserva alta de resistencia. El margen de seguridad sugerido contra la falla es, por lo tanto, mayor al usado tradicionalmente en el diseño de concreto reforzado con acero.

Resultados experimentales<sup>20</sup> indican que cuando la ruptura de las barras de refuerzo FRP es a tensión, la falla fue repentina y llevó al colapso del elemento. Cuando falla el concreto se observa una mayor progresividad, una falla menos catastrófica con una mayor deformación. El uso de concretos de alta resistencia permite el mejor uso de las propiedades de resistencia de

<sup>18</sup> Faza, S. y GangaRao, H., "Theoretical and Experimental Correlation of Behavior of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Plastic Rebars", Fiber Reinforced - Plastic Reinforcement for Concrete Structures, SP-138, ACI, 1993

<sup>19</sup> Nanni, A., "Flexural Behavior and Design of Reinforced Concrete Using FRP Rods", Journal of Structural Engineering, noviembre, 1993

<sup>20</sup> Jaeger, L.; Mutti, A. y Tadros, G., "The Concept of the Overall Performance Factor in Rectangular - Section Reinforced Concrete Beams", Proceedings of the Third International Symposium on Non - Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Japan Concrete Institute, 1997 y Pruebas realizadas en Laboratorio de Materiales, FI UNAM a barras FRP, 2002.

las barras FRP y puede incrementar la rigidez de la sección que falle, pero la susceptibilidad de los concretos de alta resistencia comparado con el concreto normal, puede reducir la deformación total del elemento a flexión.

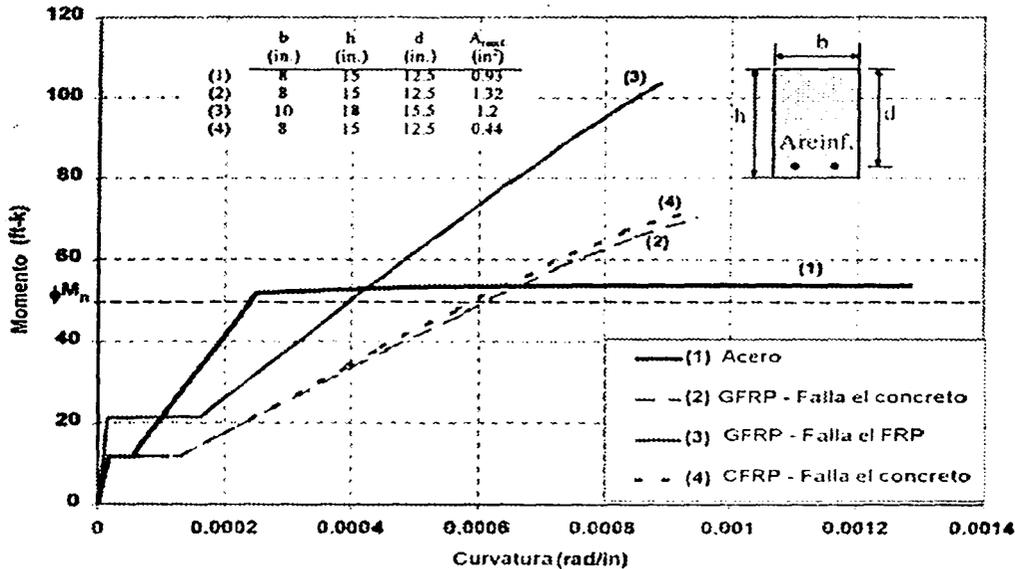


Figura 6.10 Relaciones Momento – Curvatura para secciones de concreto reforzadas con barras de acero y FRP

Fuente: Guide for the Design and Construction of CF with FRP Bars, ACI 2001

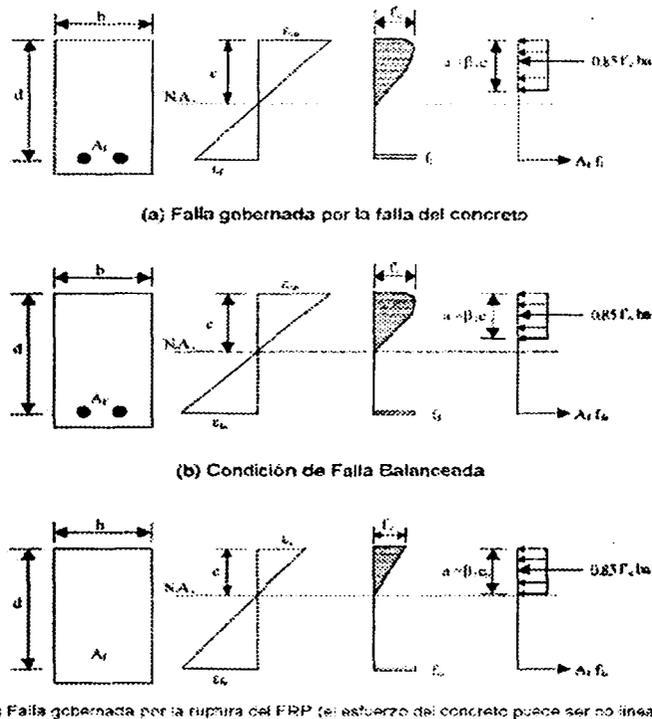
En la Figura 6.10 se muestra una comparación teórica del comportamiento momento flexionante – curvatura de la sección transversal de una viga diseñada para la misma restricción siguiendo el diseño del ACI 318. En esta figura se presentan tres casos además del refuerzo de acero: dos secciones reforzadas con barras FRPV y una reforzada con barras FRPC. Para la sección que experimenta la ruptura con barras FRPV, las dimensiones del concreto son mayores que las de otras vigas para obtener la misma resistencia de diseño.

#### 6.7.4.2 Suposiciones

Los cálculos de resistencia o esfuerzo de la sección transversal deben ser realizados en base a las siguientes suposiciones:

- La deformación del concreto y del refuerzo FRP debe ser proporcional a la distancia del eje neutro;
- La deformación a compresión máxima usable en el concreto se supone de 0.003;

- La resistencia a tensión del concreto es ignorada;
- El comportamiento a tensión del refuerzo FRP es elástico lineal hasta la falla; y
- Existe una perfecta adherencia entre el refuerzo FRP y el concreto.



**Figura 6.11** Distribución de esfuerzo y deformaciones en condiciones últimas

Fuente: Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 2001

La filosofía de diseño dice que la resistencia a flexión de un elemento no debe exceder la demanda de flexión ( $\phi M_n \geq M_u$ ). La resistencia de diseño se refiere a la resistencia nominal del elemento multiplicado por el factor de reducción de resistencia ( $\phi$ ). El momento último se refiere a la demanda por las acciones de servicio multiplicadas por los factores de carga. En este trabajo se recomienda que la demanda a flexión en un elemento de concreto reforzado con FRP sea calculada con los factores de carga requeridos por el ACI 318.

La resistencia nominal a flexión en un elemento de concreto reforzado con FRP puede ser determinada a partir de la compatibilidad de deformaciones, equilibrio de fuerzas y controlando el modo de falla. La Figura 6.11 muestra el esfuerzo, deformación y fuerzas internas de los tres posibles casos de una sección rectangular reforzada con barras FRP.

### 6.7.5 Cortante

En este trabajo, los estribos FRP y zunchos rectangulares son considerados refuerzos a cortante. Debido a que su colocación es externa, los estribos son más susceptibles a las condiciones ambientales y pueden estar sujetas a deterioro, reduciendo la vida de servicio de la estructura. Los resultados de la investigación disponible son suficientes para desarrollar guías de diseño conservadoras para refuerzo FRP a cortante.

#### 6.7.5.1 Consideraciones Generales

Existen muchos aspectos que necesitan ser atendidos cuando se usa FRP como refuerzo a cortante, estos son:

- El FRP tiene un módulo de elasticidad relativamente bajo;
- El FRP tiene una alta resistencia a la tensión y no tiene punto de fluencia;
- La resistencia a tensión de la parte doblada de una barra FRP es significativamente menor a la parte recta; y

De acuerdo con el ACI 318, el esfuerzo cortante nominal de una sección transversal de concreto reforzado,  $V_n$ , es la suma de la resistencia a cortante dada por el concreto,  $V_c$ , y el del refuerzo de acero a cortante,  $V_s$ .

Comparado con una sección reforzada con acero de igual resistencia a flexión, una sección transversal usando refuerzo FRP a flexión, después de agrietarse tiene una menor longitud al eje neutro debido a una menor rigidez axial. La región de compresión de la sección transversal es reducida y el ancho de las grietas es mayor. Algunas investigaciones en la resistencia a cortante en elementos a flexión sin refuerzo a cortante indican que la resistencia del concreto a cortante es influenciada por la rigidez del refuerzo a tensión<sup>1</sup>.

La contribución del refuerzo FRP longitudinal en términos de acción de transferencia no ha sido determinada. Debido a la resistencia y rigidez menor de las barras FRP en la dirección transversal, se supone que su contribución de acción de transferencia es menor que la de una sección con acero.

## 6.8 Software de Diseño

Actualmente, las ayudas electrónicas en el diseño de elementos están muy avanzadas; se cuenta con varios programas de cómputo que realizan las tareas del diseñador y el ingeniero. Es importante mencionar que para hacer uso de estos programas, además de conocerlos, es necesario, tener conocimiento del diseño para poder introducir los valores y saber interpretarlo.

<sup>1</sup> Nagasaka, T.; Fukuyama, H. y Tanigaki, M., "Shear Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Stirrups", Fiber - Reinforced - Plastic Reinforcement for Concrete Structures, SP-138, ACI, 1993

Existe un programa llamado S&P FRP Lamella que calcula los esfuerzos de placas de FRP para el refuerzo o rehabilitación de elementos de concreto reforzado. A partir de la introducción de datos como el código europeo<sup>22</sup> deseado, dimensiones del elemento, momento flexionante positivo o negativo, información sobre las barras de refuerzo, datos del acero y del concreto, del FRP y de las cargas, nos da el diseño de la sección transversal de la placa (número, tipo, área y resistencia).

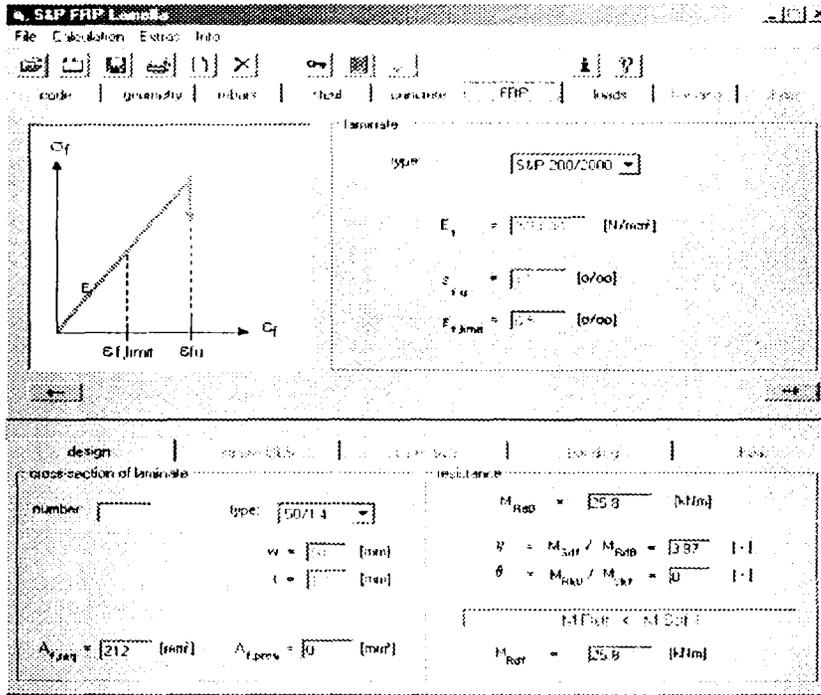


Figura 6.12 Software S&P FRP Lamella

<sup>22</sup> Sólo funciona para los Códigos Eurocode 2 & British Standard 8110.

## COMPUESTOS FRP EN MÉXICO

Para poder situar a México en el contexto de los Compuestos FRP es necesario saber la situación en la que se encuentran otros países en el mundo. Los productos que actualmente son utilizados en la industria de la construcción tienen que ser del conocimiento de los ingenieros, para poder saber lo que existe en el mercado y qué es lo que pueden utilizar para determinados proyectos en particular. A continuación se presenta una descripción de algunas de las más brillantes tecnologías y productos disponibles

### 7.1 Situación actual de los Compuestos FRP en el mundo

#### *7.1.1 Norte América*

Actualmente existen alrededor de diez compañías que comercializan las barras de refuerzo FRP para concreto en Norte América, podemos incluir Autocon Composites, Corrosion Proof Products, Creative Pultrusion, International Grating, Marshall Industries Composites, Marshall Vega Corporation, Polystructures, Polygon, Pultrall y Hughes Brothers. Además, existen otros productos FRP para la construcción con concreto, como aparatos sujetadores para cimbras, productos para construcciones inclinadas y soportes de refuerzo.

En la medida de incrementar la adherencia entre las barras FRP y el concreto, muchas compañías han hecho barras con superficies deformadas. Por ejemplo, Marshall - Vega

produjo una barra FRP de vidrio "E" con una superficie deformada, la manera en que lograron esto fue envolviendo la barra con una resina preimpregnada adicional, dejando un patrón helicoidal a 45° previo al calentamiento que polimeriza la resina. Otras barras similares son producidas por International Grating bajo el nombre de KODIAK™ y por Polystructures con el nombre de PSI Fiberbar™.

Polygon Company ha producido barras pultruidas con fibras de carbono y vidrio "S" y un con un epóxico y viniléster para la matriz. Las barras de 3 mm de diámetro, son entrelazadas para hacer un trenzado de 7 barras con un diámetro de 9.5 mm. Las aplicaciones de este prototipo fueron utilizadas en pilas marítimas (Florida) y en una plataforma de un puente (South Dakota).

International Grating produce barras FRP hechas de vidrio "E" y resina viniléster. Estas barras de refuerzo, dirigidas a refuerzo no presforzado tienen diámetros que varían entre los 9 y los 25 mm y pueden ser recubiertos con arena para mejorar la adherencia con el concreto. El esfuerzo último de estas barras decrece significativamente con el incremento del diámetro.

En Canadá, Pultrall Inc. produce las barras FRP bajo el nombre de Isorod™. Estas barras son hechas con fibras continuas longitudinales de vidrio "E" y permanecen unidas con una resina poliéster usando el proceso de pultrusión. La barra resultante tiene una superficie lisa, la cual puede ser deformada o "corrugada" enrollando helicoidalmente el mismo tipo de fibra. También puede aplicarse una resina termofija como el poliéster con un recubrimiento de arena de una distribución granulométrica específica. El corrugado puede ser ajustado usando diferentes velocidades de enrollado. Con estudios realizados de este producto se llegó a una combinación óptima de materiales constituyentes. El porcentaje de fibra de vidrio va del 73 al 78% del peso, dependiendo del diámetro de la barra. Los diámetros más comunes son 9.5, 12.7, 19.1, y 25.4 mm.

En 1993, fue construido un puente en Calgary, Canadá con vigas presforzadas con CFCC™ y Leadline™, dos productos japoneses. Además en Canadá, Autocon Composites NEFMAC™, un refuerzo FRP tipo malla. Para investigar su conveniencia para las plataformas de puentes y muros de contención en el clima canadiense, se evaluó la durabilidad y propiedades mecánicas de NEFMAC™, incluyendo fatiga y fluencia a través de pruebas a gran escala en el Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Existe otra compañía que está liderando el mercado de las barras FRP, Hughes Brother y su barra Aslan™ tienen una cantidad enorme de proyectos en los Estados Unidos. Además, ha incorporado la tecnología de las pasajuntas (dowel bar) para pavimentos.

### 7.1.2 Japón

La mayoría de los más grandes contratistas en Japón están contribuyendo al desarrollo de los materiales FRP con o sin ayuda de los sectores productivos. Se han desarrollado refuerzos en varias configuraciones como la barras lisas (fibras rectilíneas), barras deformadas o corrugadas (espiral, trenza, cruzada y torcidas), cables, cintas, mallas, redes 2-D y 3-D. La mayoría de la literatura acerca de estos materiales está en japonés, por lo que sólo se tratará de seis tipos de refuerzos FRP, populares en Japón.

CFCC™ es un cable trenzado producido por Tokyo Rope, productor de tendones de acero presforzados. Los cables son producidos de 7, 19 o 37 hilos de carbón entrelazados. El diámetro

nominal de estos cables varía entre 5 y 40 mm. Estos cables son adecuados para el pretensado o para el post tensado interno o externo. También existen, dependiendo de la aplicación, aparatos y métodos para su anclaje. Tokyo Rope formó una sociedad con P.S. Concrete Co. para desarrollar el uso del CFCC™ en las estructuras de concreto prefabricado. En 1988, las dos compañías participaron en la construcción del primer puente carretero presforzado japonés usando tendones FRP.

Leadline® es un tipo de barra de carbón FRP presforzada producida por Mitsubishi Chemical con Dialead™ (carbón). Leadline™ está disponible en diámetros de 1 a 17 mm para barras circulares lisas, y en 5, 8, 12 y 17 mm de diámetro para barras corrugadas. Leadline® ha sido utilizado para el presforzado (pre y post tensado) de puentes y edificios industriales en Japón. Mitsubishi Chemical y Tonen producen una lamina de fibra de carbono que ha sido usada para el rehabilitamiento de muchas chimeneas de concreto reforzado en Japón. Este producto es usado también para reforzar columnas y vigas de puentes carreteros en Estados Unidos.

FIBRA™, es una barra de FRP – aramida desarrollada por Mitsui Construction; consiste en hilos entrelazados preimpregnados con epóxico. El entrelazado permite que se produzca un diámetro largo y eficiente, los diámetros varían entre 3 y 20 mm y proveen una superficie corrugada para una mayor adherencia mecánica con el concreto. La barra FIBRA® está compuesta de un 60% de aramida y un 40% de epóxico por volumen. El esfuerzo último y el módulo de elasticidad del compuesto son aproximadamente el 80% del volumen correspondiente a la aramida, y la eficiencia se reduce muy poco conforme el diámetro aumenta. Con el control de unión de los hilos entrelazados, se pueden producir barras rígidas o flexibles. Esta última es preferible para el fácil manejo y transportación. Después de que ha endurecido el epóxico, se puede añadir arena sílica para incrementar la adherencia mecánica. Algunas aplicaciones incluyen un triple claro en puentes peatonales y losas planas post tensionadas. En un proyecto residencial se usaron viguetas prefabricadas presforzadas reforzadas con FIBRA® y sobre estas viguetas se construyó la losa del primer nivel.

La barra Technora™, producida por Sumimoto Construcción y Teijin (industria textil), está hecha por la pultrusión de fibras de aramida rectas impregnadas con resina viniléster. Un hilo impregnado adicional es enrollado espiralmente alrededor de la barra lisa antes del curado de la resina para dar la adherencia con el concreto. Las barras corrugadas están disponibles en dos diámetros, 6 y 8 mm. También existen ramilletes de 3 a 19 hilos que forman un cable. El anclaje de los tendones es obtenido con un sistema de cuñas o un sistema de cintas adhesivas. En la primavera de 1991, dos puentes fueron construidos en su totalidad (pretensado y post tensado, respectivamente) usando estos tendones.

NEFMAC™ es un refuerzo tipo malla 2-D, la cual consiste en fibras de carbono y vidrio impregnadas con resina. Esta fue desarrollada por Shimizu Corporation, una de las constructoras japonesas más grandes. NEFMAC™ esta formada en mallas planas o curvas por medio de un proceso similar al enrollamiento de filamentos. Se encuentra disponible en muchas combinaciones de fibras (por ejemplo: vidrio, carbono, vidrio-carbono) y áreas de sección transversal de 5 a 400 mm<sup>2</sup>. Ha sido usado en aplicaciones de recubrimiento en túneles, construcciones costa afuera, y plataformas de puentes. Sus aplicaciones en edificios han sido en muros o paneles de separación ligeros.

El tejido 3-D es hecho con hilos itinerantes, el cual se teje en tres direcciones, y es impregnado con epóxico, éste fue desarrollado por Kajima Corporation, otra gran constructora japonesa.

La producción de este tejido 3-D es totalmente automática y permite la creación de diferentes formas, con diferentes fibras y espaciamientos de acuerdo a las especificaciones de diseño. Este refuerzo fue desarrollado para el uso en edificios como muros ligeros de separación, parapetos, particiones y cimbras permanentes. Los resultados experimentales y pruebas de campo han demostrado que los paneles de refuerzo FRP 3-D tienen la suficiente resistencia y rigidez para soportar las cargas por viento y fácilmente pueden alcanzar la resistencia para soportar 60 minutos de fuego.

### *7.1.3 Europa*

Arapree™ fue desarrollado entre el productor químico alemán Akzo Nobel y el contratista alemán HBG. El compuesto consiste en fibras de aramida (Twaron™) embebidas en una resina epóxica. Las fibras constituyen aproximadamente el 50% del compuesto y son colocadas paralelamente. La sección transversal puede ser rectangular o circular. Este material es usado preferentemente como tendón en aplicaciones de pretensado con una fuerza de presfuerzo igual al 55% de la carga última, para evitar la ruptura por fluencia. Para un anclaje temporal (pretensado), han sido creadas calzas de poliamida para tomar la fuerza del presfuerzo a la capacidad máxima del tendón. Las aplicaciones reportadas han sido para fijar muros antiruido en autopistas y zona de pesca en una planta hidroeléctrica, losas aligeradas con aberturas, losas voladas y mampostería reforzada.

Parafil™, es un cable producido por la inglesa ICI Linear Composites Ltd. Estos cables fueron originalmente desarrollados no para aplicaciones en la construcción, sino para amarrar boyas y plataformas marinas, pero cuando se encontró la conveniencia en aplicaciones estructurales se hicieron con fibras duras como las de aramida. El tipo G de Parafil™ consiste en un núcleo de fibras de aramida continuas empacadas paralelamente, contenidas en una funda termoplástica. La funda mantiene el perfil circular del cable y protege al núcleo sin ninguna adición a sus propiedades estructurales. Existen muchos mecanismos de anclaje para este tipo de cable. Los tendones Parafil™ pueden ser usados como refuerzo no adherido o como refuerzo externo presforzado.

Las barras Polystal™ son el resultado de la unión de dos compañías alemanas, Strabag Bau - AG (contratista / diseñador) y Bayer AG (química). Una barra tiene el diámetro de 7.5 mm y consiste en fibras de vidrio "E" y saturada de resina poliéster. Se aplica una capa de 0.5 mm de poliamida como último paso del proceso de producción para protegerla del ataque alcalino y para dar una protección mecánica durante el manejo. Es posible, integrar directamente un sensor de fibra óptica dentro del material de la barra durante la fabricación, con el propósito de monitorear su comportamiento cuando se encuentre en servicio. El anclaje se obtiene metiendo el cable en un tubo de acero y rellenándolo con mortero de resina sintética. Sus aplicaciones datan desde 1980, incluyendo puentes en Alemania y Austria y la reparación de una estación de tren en Francia.

BRI-TEN™ es una barra de compuestos FRP genérica producida por British Ropes Ltd. de la Gran Bretaña. La barra puede ser hecha con fibras de aramida, carbono o vidrio "E" dependiendo de la intención de uso. Estas barras son producidas con hilos de fibras continuas embebidas en una matriz de resina termofija. Con una relación fibra / resina de aproximadamente 2:1, se pueden fabricar barras lisas con diámetros que varían entre 1.7 y 12 mm. Estudios

experimentales han conducido a entrelazados con un diámetro nominal de 45 mm, ensamblando 61 hilos individuales de 5 mm de diámetro cada uno.

JONC J.T. <sup>TM</sup> es un cable FRP producido por la textil francesa Cousin Freres S.A. El cable usa tanto fibras de carbono como de vidrio. El cable consiste en fibras paralelas impregnadas de resina dentro de una funda trenzada. La resina para la matriz puede ser poliéster o epóxica. Este cable no está producido precisamente para la construcción.

SPIFLEX<sup>TM</sup> es un compuesto FRP producto de Bay Mills (Francia), el cual puede ser hecho usando aramida, carbono o vidrio "E". El polímero termoplástico usado para la matriz depende del tipo de fibra y de su uso esperado. De manera similar, cualquier sección transversal puede ser obtenida dependiendo el uso que vaya a tener.

#### 7.1.4 Latinoamérica

La situación en Latinoamérica es muy parecida a la de México, el ingreso de esta metodología a algunos países de Latinoamérica lleva dos años y cuenta con pocas obras reforzadas en comparación con los Estados Unidos y Japón, donde se trabaja desde hace años con este tipo de productos; asimismo se ha aplicado este sistema en una gran cantidad de obras. A nivel Sudamericano, Colombia lidera el campo de las innovaciones en los refuerzos de estructuras con numerosos trabajos con FRP (puentes, edificios de oficinas y estacionamientos). En Colombia se están realizando desde el año 1996 reforzamientos de estructuras de concreto con el sistema de materiales compuestos FRP Sika CarboDur<sup>TM</sup>. El sistema se compone de tiras o platinas preformadas y de laminas hechas con tejidos SikaWrap<sup>TM</sup>. Las primeras aplicaciones con tiras se hicieron en el año 1996 y con laminas en 1998. Este sistema es conocido por los calculistas estructurales y forma parte de las alternativas para reforzamiento de estructuras de concreto, de esta forma hoy en día su uso es mas extendido y en el futuro lo seguirá siendo. A continuación se presenta un tabla resumen, a diciembre de 1999, con las obras de referencia de Colombia y otros países latinoamericanos. Luego de esa fecha ya se han realizado proyectos en Colombia y otros países como Guatemala, Panamá, Ecuador, Perú, Chile, Argentina y México, sin embargo los cuadros no se han actualizado.

Tabla 7.1 Proyectos desarrollados en Latinoamérica hasta el 2000\*

| <b>País</b> | <b>Año</b> | <b>Localización</b>                           | <b>Obra</b>                                                                                | <b>Tipo de Refuerzo FRP</b> | <b>Cantidad</b> |
|-------------|------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Bolivia     | 1998       | Edificio Cervecería Boliviana Nacional        | Reforzamiento a flexión de losa por incremento de carga de servicio                        | Tiras FRPC                  | 80 m            |
| Bolivia     | 1998       | Edificio Central Termoeléctrica Valle Hermoso | Reforzamiento a flexión de losa                                                            | Tiras FRPC                  | 100 m           |
| Colombia    | 1996       | Puente Cocomá, Antioquia                      | Reforzamiento de las luces compensatorias y voladizos de concreto reforzado por sobrecarga | Tiras FRPC                  | 163 m           |

Tabla 7.1 Continuación

| <b>País</b> | <b>Año</b> | <b>Localización</b>                                   | <b>Obra</b>                                                                                     | <b>Tipo de Refuerzo FRP</b> | <b>Cantidad</b> |
|-------------|------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Colombia    | 1996       | Puente El Consuelo, Purificación - Tolima             | Reforzamiento de las vigas longitudinales de concreto reforzado por sobrecarga                  | Tiras FRPC                  | 55 m            |
| Colombia    | 1997       | Edificio Banca Caja Social, Bogotá                    | Reforzamiento de losa de entrepiso reticular por abertura de losa                               | Tiras FRPC                  | 32 m            |
| Colombia    | 1997       | Edificio Credisocial, Santiago de Cali                | Reforzamiento a flexión de vigas de concreto reforzado por deficiencia de refuerzo              | Tiras FRPC                  | 20 m            |
| Colombia    | 1997       | Puente El Tigre, Córdoba                              | Reforzamiento viga cabezal por sobrecarga                                                       | Tiras FRPC                  | 12 m            |
| Colombia    | 1997       | Puente El Can, Córdoba                                | Reforzamiento viga cabezal por sobrecarga                                                       | Tiras FRPC                  | 12 m            |
| Colombia    | 1997       | Puente Los Nietos, Córdoba                            | Reforzamiento viga cabezal por sobrecarga                                                       | Tiras FRPC                  | 12 m            |
| Colombia    | 1997       | Edificio Banco de Occidente, Cali                     | Reforzamiento losa de entrepiso reticular por sobrecarga debido a relocalización de escaleras   | Tiras FRPC                  | 31 m            |
| Colombia    | 1997       | Puentes Av. Caracas, Bogotá                           | Reforzamiento a flexión de vigas postensadas por sobrecarga                                     | Tiras FRPC                  | 484 m           |
| Colombia    | 1997       | Edificio de Enfermería Universidad Nacional de Bogotá | Reforzamiento de vigas de concreto por modificación de la estructura                            | Tiras FRPC                  | 52 m            |
| Colombia    | 1997       | Planta de lubricantes Mobil, Soacha                   | Reforzamiento de viga de concreto reforzada por aumento de cargas                               | Tiras FRPC                  | 7 m             |
| Colombia    | 1997       | Edificio Compressor House Ecopetrol, Barrancabermeja  | Reforzamiento de viga de concreto reforzado por aumento de cargas por nuevos equipos            | Tiras FRPC                  | 42 m            |
| Colombia    | 1998       | Edificio del Colegio Gimnasio Moderno, Bogotá         | Reforzamiento de muro de mampostería por movimientos de la cimentación                          | Tiras FRPC                  | 9 m             |
| Colombia    | 1998       | Puente Vía Sulamarchan, Bogotá                        | Reforzamiento a flexión de vigas por sobrecarga                                                 | Tiras FRPC                  | 54 m            |
| Colombia    | 1998       | Edificio del Museo El Minuto de Dios                  | Reforzamiento de losa de concreto reforzado por control de fisuramiento                         | Tiras FRPC                  | 15 m            |
| Colombia    | 1998       | Puente Carretera Viani, Cundinamarca                  | Reforzamiento a flexión y cortante de vigas por sobrecarga                                      | Tiras FRPC                  | 39 m            |
| Colombia    | 1998       | Centro Comercial en Barranquilla                      | Reforzamiento viguetas de losa de concreto por deficiencia de refuerzo                          | Tiras FRPC                  | 652 m           |
| Colombia    | 1998       | Edificio Los Morros, Cartagena                        | Reforzamiento de losa y vigas por aumento de carga debido a colocación de piscina sobre la losa | Tiras FRPC                  | 84 m            |





| <b>País</b> | <b>Año</b> | <b>Localización</b>                      | <b>Obra</b>                                       | <b>Tipo de Refuerzo FRP</b> | <b>Cantidad</b> |
|-------------|------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Uruguay     | 1999       | Conjunto de Viviendas Libertas, San José | Refuerzo de cimentación por armadura insuficiente | Tiras FRPC                  | 11 m            |
| Uruguay     | 1999       | Edificio Rambla, Montevideo              | Refuerzo de losa enervada afectada por fuego      | Tiras FRPC                  | 18 m            |

\*Con excepción de México. Datos hasta el 2000.  
Fuente: Sika Colombia

También en Latinoamérica tiene presencia MBT con el Sistema MBrace™. El uso de FRP en los Estados Unidos y Latinoamérica está retrasado con respecto a Europa y Japón y no existen hoy reglas claras para el diseño de concreto con reforzamiento con compuestos FRP.

## 7.2 Situación Actual en México

La entrada de los compuestos FRP fue aproximadamente en 1998, y ha tenido actividad en el área de reforzamiento y rehabilitamiento. Existen tres empresas que actualmente manejan los compuestos CFRP para los propósitos antes mencionados.

Masters Builders Technologies (MBT) México tiene disponibles las láminas de fibra de carbono con el sistema MBrace™ de refuerzo de adhesión externa CF 130 (alta resistencia) y CF 530 (alto módulo) que se han utilizado en aproximadamente 15 proyectos en México. Sin embargo, también tiene productos de vidrio y aramida que no han sido utilizados en México.

En febrero de 1998 se comenzaron los trabajos de MBT México en el área de los compuestos FRP con el confinamiento de dos columnas de concreto en un pequeño restaurante, este trabajo fue de mejoramiento estructural y se realizó en un área de 3.08 m<sup>2</sup>. La tabla 7.2 muestra los trabajos que hasta la fecha ha realizado MBT México.

Actualmente, MBT México tiene un convenio con la norteamericana Hughes Brothers, fabricante de barras FRPV para concreto reforzado, como distribuidor de esta barra en México.

Sika Mexicana al igual que sus distribuidoras en América Latina cuenta con los sistemas Sika Carbodur™ y SikaWrap™. Las tiras o platinas Sika Carbodur™ son hechas con fibras de carbono y los tejidos SikaWrap™ están disponibles en fibra de vidrio y carbono con un sistema de aplicación en seco y en húmedo. Sika Carbodur™ también está disponible con diferentes rigideces (Carbodur™ S, M y H). A continuación, en la tabla 7.3 se presenta un resumen de las obras que ha realizado Sika Mexicana.

Tabla 7.2 Proyectos realizados en México por MBT

| Propietario               | Lugar               | Fecha  | Tipo de Aplicación                               | Tipo de Deficiencia    | Tipo de Elemento       | Área (m <sup>2</sup> ) | Descripción                                                                                                   |
|---------------------------|---------------------|--------|--------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Restaurante               | Ciudad de México    | Feb 98 | Mejoramiento Estructural                         | Confinamiento          | Columna de concreto    | 3.08                   | 2 columnas                                                                                                    |
| Tubos de Acero de México  | Veracruz, Veracruz  | 1999   | Mejoramiento Estructural                         | Confinamiento          | Columna de concreto    | 20                     | -----                                                                                                         |
| Mercado de la Merced      | Ciudad de México    | 1999   | Rehabilitamiento                                 | Flexión                | Losas                  | -----                  | Reforzamiento de losas a flexión del acero superior de cascarnes después de incendio                          |
| CAPUFE                    | Puente Polotitlán   | Mar-99 | Mejoramiento Estructural                         | Flexión                | Losa                   | 109                    | Reforzamiento a flexión en determinadas áreas del puente con 45 años de servicio. Se aplicaron 2 capas de FRP |
| Bancomer                  | Ciudad de México    | Jun-99 | Mejoramiento Estructural                         | Cortante               | Viga                   | 5.6                    | Edificio Corporativo                                                                                          |
| Médica Sur                | Ciudad de México    | Jun 99 | Mejoramiento Estructural                         | Flexión                | Viga                   | 11.63                  | Reforzamiento de una viga a flexión en Centro Hospitalario                                                    |
| Hipódromo de las Americas | Ciudad de México    | Jul 99 | Mejoramiento Estructural                         | Confinamiento          | Columna de concreto    | 15.82                  | 4 columnas en gradas de la pista de carreras                                                                  |
| Embajada de EUA en México | Ciudad de México    | Jul-99 | Mejoramiento Estructural                         | Flexión                | Viga                   | 4.24                   | Reforzamiento de una viga a flexión                                                                           |
| Cushman & Wakefield/GCI   | Ciudad de México    | Jul 99 | Mejoramiento Estructural                         | Flexión                | Viga                   | 3.4                    | Reforzamiento de una viga a flexión en Edificio Corporativo                                                   |
| Hospital San Alejandro    | Puebla, Puebla      | Dic-99 | Mejoramiento Estructural                         | Servicialidad          | Columna de concreto    | 19                     | Reforzamiento de la sección superior de las columnas después de sismo                                         |
| Sabritas                  | Orizaba, Veracruz   | Abr-00 | Control de grietas, Restauración de la capacidad | Flexión, Servicialidad | Muro de concreto, viga | 96.25                  | Reparación de un muro en un tanque de tratamiento de aguas residuales y una viga                              |
| CAPUFE                    | Puente Ocotlán      | 2000   | Restauración de la capacidad                     | Flexión                | Viga ASHHTO            | -----                  |                                                                                                               |
| Plaza de las Americas     | Cancún, Mérida      | 2000   | Mejoramiento Estructural                         | Confinamiento          | Columnas de concreto   | -----                  |                                                                                                               |
| Mueblería                 | Cd. Obregón, Sonora | 2000   | Mejoramiento Estructural                         | Confinamiento          | Columnas de concreto   | -----                  |                                                                                                               |
| Ciudad de Acapulco        | Puente La Quebrada  | 2002   | Mejoramiento Estructural                         | Flexión                | Vigas                  | -----                  | Reparación de las vigas dañadas por la salinidad del mar                                                      |

Fuente: MBT México, 2002

Otra empresa que hace trabajos de rehabilitación, reforzamiento o reparación con el sistema de adhesión externa con fibra de carbono es Freyssinet<sup>TM</sup> de México. Su sistema lleva el mismo nombre de la empresa y relativamente tienen pocos trabajos hechos en México. El despacho de ingeniería estructural Euroestudios tiene registrados los siguientes trabajos: reforzamiento de columnas del Puente Pozuelos en la carretera México – Acapulco; reforzamiento del tablero de un puente en la carretera Peñón – Texcoco; reforzamiento de las columnas del distribuidor vial Actopan – Pachuca; reforzamiento de una losa plana de un paso de ferrocarril en la carretera México – Querétaro y se realizó una obra de reforzamiento de los apoyos de traveses en la Estación Bayamón en Puerto Rico.

Tabla 7.3 Proyectos realizados por Sika Mexicana

| Proyecto                    | Lugar              | Problema                                                                          | Solución                                                                                       |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Templo                      | Querétaro          | Insuficiencia de resistencia a flexión en traveses                                | Reforzamiento con Sika Carbodur 5512                                                           |
| Puente                      | Michoacán          | Insuficiencia de resistencia a flexión en traveses                                | Reforzamiento con Sika Carbodur 10S12                                                          |
| Edificio oficinas           | Ciudad de México   | Baja resistencia sísmica en columnas                                              | Reforzamiento con SikaWrap Hex 103C para lograr un incremento de resistencia por confinamiento |
| Edificio de usos múltiples  | Ciudad de México   | Agrilamiento de traveses e insuficiencia de resistencia sísmica                   | Reforzamiento con Sika Carbodur 5512 y Sika Wrap Hex 103C                                      |
| Edificio de usos múltiples  | Ciudad de México   | Insuficiencia de resistencia sísmica                                              | Reforzamiento con Sika Carbodur 5512 y Sika Wrap Hex 103C                                      |
| Edificio de oficinas        | Ciudad de México   | Baja resistencia del concreto de columnas                                         | Encamisado de columnas con SikaWrap 103C                                                       |
| Estacionamiento             | Monterrey, NL      | Acero de refuerzo insuficiente en zonas de momento negativo en losas de entrepiso | Reforzamiento con placa SikaCarbodur 5512 y 10S12                                              |
| Viviendas de interés social | Texcoco, Edo. Mex. | Acero insuficiente en losas de entrepiso y azotea de 60 viviendas                 | Reforzamiento con placa SikaCarbodur 5512, 8S12 y 10S12 en tiras de 4 y 5 cm de ancho          |

Fuente: Sika Mexicana, 2002

La empresa Nover – Tec es la distribuidora de la barra C – BAR<sup>TM</sup> de vidrio de Marshall Industries, con datos de la empresa ha sido escasa la participación en el mercado mexicano con la excepción de una obra que se realizó en el puerto de Tampico, aunque fue menor.

## 7.3 Perspectivas de los Compuestos FRP en México

---

Debido a la fuerte crisis que atraviesa la construcción en México es muy difícil que exista construcción nueva, por lo que hace más difícil la entrada de ciertas formas de compuestos FRP como las barras. Sin embargo, el campo de los elementos prefabricados tanto presforzados como postensados tienen una gran participación en la construcción, por lo que es un mercado viable para los tendones y algunas barras FRP.

La empresa Irving, que se dedica a estructuras y perfiles de fibra de vidrio orientado a la fabricación de rejillas industriales, ha fabricado su primer lote de barras FRPV para el Concurso Interuniversitario de Vigas de Concreto reforzado con FRP, el cual organiza el Capítulo Estudiantil ACI UNAM, la Sección Centro y Sur de México del ACI y la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Esta empresa tiene buenas perspectivas para la comercialización de su barra FRPV.

Debido al elevado costo de la construcción nueva y además al creciente número de estructuras de concreto que requieren ser rehabilitadas, la necesidad de reparar o reforzar estructuras de concreto armado está creciendo significativamente. En respuesta a esta necesidad, se encuentra la tecnología de reforzamiento estructural. La adherencia de placas de acero ha sido un concepto de la reparación del concreto en los últimos 20 años. Sin embargo, el alto costo de colocar las placas usualmente pesadas, las dificultades con el empalme de las placas, y lo relacionado con la corrosión de las laminas de acero, ha limitado el uso de esta técnica. Debido a las excelentes propiedades peso-reforzamiento de las láminas y tiras FRP a la reciente reducción de los costos del material, a la relativa disponibilidad ilimitada de longitud del material, a su instalación comparativamente simple, y a la inmunidad a la corrosión, se ha logrado que el uso de láminas FRP para el reforzamiento esté ganando prestigio sobre la pega con láminas de acero y que esté avanzando el concepto del reforzamiento con pega externa. A medida que se van desarrollando técnicas costo-efectivas en la producción de Fibras de Refuerzo con Polímeros FRP continúa el incremento de sus aplicaciones.

Además, existen 6.500 puentes según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la red federal, de los cuales sólo se reconstruirán 106 puentes, esta tecnología de adhesión externa es una alternativa bastante viable para mantener en buen estado los puentes carreteros, además, existe la alternativa de las plataformas con FRP, lo que hace a los puentes carreteros una excelente opción para aplicación de los materiales FRP.

Por otra parte, el costo de los trabajos y el material se ha ido reduciendo. Cuando comenzaron a hacerse trabajos en México, el metro cuadrado de fibra de carbono era de más de cuatro mil pesos, ahora, el metro cuadrado de material es de seiscientos cincuenta pesos, esto es, que se ha ido utilizando más el material y los estructuristas lo empiezan a emplear más convencidos de sus ventajas.

Las construcciones que están en ciudades junto al mar, también son un buen nicho de mercado para los compuestos FRP debido a la salinidad que existe en el ambiente y a las ventajas de durabilidad del concreto en que se utilizan compuestos FRP. En el caso de Veracruz, se han implementado otros sistemas muy costosos y muchas veces no son efectivos para combatir la corrosión en las estructuras de concreto reforzado.

A lo largo del trabajo se han ido observando y citando una gran cantidad de beneficios y ventajas que tienen los nuevos materiales como los compuestos FRP sobre los materiales tradicionales de construcción como el acero, el aluminio, la madera o incluso el concreto mismo. Aunque las estadísticas prevean un creciente uso de estos materiales en la construcción y la infraestructura civil, la realidad es que en países como Estados Unidos, Japón, Canadá y Europa están haciendo esfuerzos por que así sea, pero en Latinoamérica y nuestro país existen una serie de barreras que impiden el uso de esta tecnología.

La falta de conocimiento sobre la existencia de este material es una de las más grandes barreras aunado a la falta de información histórica sobre el comportamiento y el desempeño que tienen los materiales compuestos FRP, esto lleva a que la industria de la construcción no los tenga reconocidos.

Estando el ingeniero civil no familiarizado con los materiales FRP es difícil su utilización y sobre todo, el interés por aparecer en las Normas y Reglamentos locales. Este punto es muy importante ya que es la base para la utilización del FRP. Se debe buscar incluir ciertos apartados en la normatividad vigente para poder usarlos. Además, los fabricantes realizan productos relativamente diferentes, ya que usan diferentes resinas, fibras y formas, lo que lo hace difícil de estandarizar.

Existen recomendaciones y guías para poder diseñar y construir con FRP, en México no sólo basta con que el diseño pase nuestro Reglamento, hay que buscar introducir este rubro en él. Es necesario, seguir al pie de la letra las indicaciones y las recomendaciones de los fabricantes y conocer muy bien el comportamiento del material y saber exactamente qué propiedades son las que queremos que el material desempeñe.

Además, existen otro tipo de barreras, como lo son los altos costos iniciales, pero debemos reconocer que realizando un análisis de costos del ciclo de vida, resulta más efectivo utilizar los materiales FRP, aunque en un principio haya que solventar los costos de los materiales de nueva tecnología, como investigación y monitoreo. Es necesario empezar a hacer conciencia sobre este tipo de análisis donde se involucren aspectos cualitativos que son cuantificados de alguna manera, lo que representa los costos de retardo de un conductor, daño al vehículo o la molestia que conlleva una obra de reparación o rehabilitación, entre otras. Todo esto, ligado a la durabilidad, aunque como se menciona antes, hace falta información y datos para poder dar un juicio certero, podemos concluir que un material FRP es más durable y hace a la estructura más durable que los materiales convencionales.

Existe una gran cantidad de áreas de la ingeniería civil donde podemos aprovechar las ventajas de los compuestos FRP, se pueden corregir malas prácticas constructivas, errores de diseño, cuando las estructuras necesitan un aumento de carga, para reforzar concreto, el cual es un material fundamental para la construcción de instalaciones y estructuras

Un gran mercado es el de los puentes, debido a que la infraestructura en general en México tienden a envejecer, se necesita de una rehabilitación y reparación que va aumentando. Al sustituir elementos como una plataforma de un puente, se decrementa el peso por carga muerta, lo que nos permite aumentar significativamente la capacidad de carga.

Paralelamente, la ventaja que nos ofrece ante el medio ambiente es muy grande, ya que podemos controlar aspectos del material que son especiales. Los materiales de compuestos FRP son mejores en todos los aspectos que los tradicionales, y hay que buscar consolidar esta parte en el ámbito de la construcción. Además, en la producción de los FRP no se daña el medio ambiente, se necesita muy poca área para poder instalar el equipo, sin embargo, el acero necesita de grandes instalaciones y genera una cantidad enorme de contaminación.

El ahorro de tiempo debido a la rapidez de instalación y de transportación es un beneficio que puede repercutir en los programas de obra y en el costo final. Si bien se necesita empezar a trabajar con este material en México, valdría la pena que las instituciones gubernamentales pudieran empezar a liderar este esfuerzo junto con las universidades, la infraestructura nacional está muy dañada y urge mucha infraestructura nueva. Las universidades deben tomar la iniciativa realizando investigación complementaria a la que ya existe, y así probar estos materiales en las condiciones y clima propios del país.

Si bien es cierto que México aún está en desventaja con los países desarrollados e incluso con países como Colombia, México tiene grandes oportunidades para realizar proyectos con compuestos FRP.

El costo efectivo de la barra FRP es mejor que el del acero, es decir, el costo por unidad de resistencia es menor en una barra FRP, así como esta comparación existen muchas, pero sólo el estructurista y el dueño del proyecto pueden decidir el uso de esta tecnología. Por lo tanto, podemos concluir que los materiales compuestos FRP son un sustituto viable y benéfico de los materiales convencionales de construcción.

ACI Comité 440, 2001. "State of the Art on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures," Manual of Concrete Practice 2001, Parte 5 ACI 440R – 96, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., EUA.

ACI Comité 440, 2001. "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars", ACI 440.1R – 01, American Concrete Institute, Farmington Hills, EUA.

ACI, 1999. "Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures", 4o Simposium Internacional, SP – 188, Editores: Charles W. Dolan, Sami H. Rizkalla y Antonio Nanni, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., EUA.

Benmokrane, B.; Rahman, H., 2001. "Fiber Optic Sensors Monitor in FRP Reinforced Bridge", Concrete Internacional, ACI, Vol. 23, No 6, pags 33 – 38.

Chin, J.W., 1996. "Materials Aspects of Fiber reinforced Polymer Composites in Infraestructure", National Institute of Standards for Technology NIST, Gaithersburg, MD, EUA.

Darwish, M.N., 2000. "Upgrading Reinforced Concrete Columns by Jacketing with Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Sheets", 4o Simposium Internacional "Repair, Rehabilitation and Maintenance of Concrete Structures and Innovation in Design and Construction, SP – 193, Editor: Malhotra V.M., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., EUA.

Dolan, C.W., 1999. "FRP Prestressing in the U.S.A.", Concrete Internacional, ACI, Vol. 21, No 10, pags 21 – 24.

Eddie, D.; Shalaby, A. Y Rizkalla, S., 2001. "Glass Fiber Reinforced Polymer Dowels for Concrete Pavements", Revista Estructural, ACI, Vol. 98, No. 2, pags 201 – 206.

Ehlen, M.A., 1997. "Life Cycle Costs of New Materials", Revista de Sistemas de Infraestructura, NIST, Diciembre, EUA.

Ehlen, M.A. y Marshall, H.E., 1996. "The Economics of New – Technology Materials: A Case Study of FRP Bridge Decking", National Institute of Standards for Technology NIST, Gaithersburg, MD, EUA.

Fukuyama, H., 1999. "FRP Composites in Japan", Concrete Internacional, ACI, Vol. 21, No 10, pags 29 – 32.

Grace, N.F. y Abdel – Sayed, G., 1996. "Double Tee and CFRP/GFRP Bridge System". Concrete Internacional, ACI, Vol. 18, No 02, pags 39 – 44.

Karbhari, V.M. y Seible, F., 1999. "Design Considerations for the use of Fiber Reinforced Polymeric Composites in the Rehabilitation of Concrete Structures", División de Ingeniería Estructural, Universidad de California en San Diego. La Jolla, CA, EUA.

Kelley, P.L.; Brained, M.L. y Vatovec, M., 2000. "Design Philosophy for Structural Strengthening with FRP", Concrete Internacional, ACI, Vol. 22, No 2, pags 77 – 82.

Masuda, Y.; Motohashi, K.; Kage, T. Y Ina, I., 2000. "Study on Construction Method and Durability of Carbon Fiber Reinforced Plastic Sheet for Retrofitting Reinforced Concrete Structures", CANMET/ACI, Durability of Concrete, Editor: Malhotra V.M., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., EUA.

MDA, 1999. "Production Selection Guide: FRP Composite Products for Bridge Applications," Editor John P. Busel. Market Development Alliance of the FRP Composite Industry, 1a edición, Harrison, NY, EUA.

MBT, 1998. "Sistema Compuesto de Refuerzo MBrace<sup>TM</sup>", Guía de diseño estructural, 2ª edición, Masters Builders, Inc., EUA.

Rizkalla, S. y Labossière, P., 1999. "Structural Engineering with FRP – in Canada", Concrete Internacional, ACI, Vol. 21, No 10, pags 25 – 28.

Scalzi, J., 2000. "Will FRP Composites Ever Change Bridge Engineering", Concrete Internacional, ACI, Vol. 22, No 04, pags 56 – 58.

Sika Carbodur, 2000. "Reforzamiento con Sistemas de Fibras de Carbono (CFRP) para Estructuras de Concreto y Madera", Guía de Diseño e Instalación Platinas Sika Carbodur<sup>TM</sup>, Colombia.

Sika Carbodur, 2000. "Reforzamiento con Sistemas de Fibras de Carbono (CFRP) y Fibras de Vidrio (GFRP) para Estructuras de Concreto y Madera", Guía de Diseño e Instalación Tejidos SikaWrap<sup>TM</sup>, Colombia.

Taerwe, L.R. y Matthys, S., 1999. "FRP for Concrete Construction: Activities in Europe", Concrete Internacional, ACI, Vol. 21, No 10, pags 33 – 36.

### *Sitios en Internet*

American Concrete Institute

<http://www.concrete.org>

American Society for Testing and Materials

<http://www.astm.org>

Akzo Nobel

<http://www.akzonobel.com>

Autocon Composites

<http://www.autoconcomposites.com>

Civil Engineering Research Foundation (CERF)

<http://www.cerf.org>

Composites Fabricators Association

<http://www.cfa-hq.org>

Conferencia Internacional ITI sobre Puentes

<http://iti.acns.nwu.edu/technology/conferences>

Creative Pultrusions

<http://www.pultrude.com>

Federal Highway Administration

<http://www.fhwa.dot.gov>

Hughes Brothers Inc.

<http://www.hughesbros.com>

ICI Linear Composites

<http://www.linearcomposites.com>

Internacional Grating Inc.

<http://www.igicomposites.com>

ISIS Canadá

<http://www.isis>

Market Development Alliance for the Composite Industry

<http://www.mdacomposites.org>

Mitsubishi Chemical

<http://www.m-kagaku.co.jp>

Mitsui Corporation

<http://www.mcc.co.jp>

Mundo de Fibra de Vidrio  
<http://www.fiberglass.com>

National Institute for Standards and Technology  
<http://www.nist.gov>

New Technologies for Construction  
<http://www.new-technologies.org>

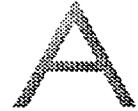
Owens Corning Co.  
<http://www.owenscorning.net>

Pultrall  
<http://www.pultrall.adsinc.ca>

Sumitomo Construction  
<http://www.sumiken.co.jp>

Technora  
<http://www.teijin-aramid.com>

Tokyo Rope  
<http://www.tokyoropeco.jp/english>



## MÉTODOS DE PRUEBA Y OTROS ESTÁNDARES RELACIONADOS CON FRP

### *American Society for Testing and Materials (ASTM)*

- C393-62 Método de Prueba Estándar para Determinar las Propiedades a Flexión de Construcciones Sándwich Planas.
- C581 Práctica Estándar para Determinar la Resistencia Química de las Resinas Termofijas Proyectadas para Estructuras.
- D256 Método Estándar para Determinar la Resistencia a Impacto de Plásticos y Materiales para Aislamiento Eléctrico.
- D638 Método de Prueba para Propiedades de Tensión de los Plásticos.
- D648 Método de Prueba para Determinar la Temperatura de Deflexión de Plásticos bajo Carga a Flexión.
- D696 Método de Prueba Estándar para Determinar el Coeficiente de Expansión Térmica Lineal de los Plásticos entre  $-30^{\circ}\text{C}$  y  $30^{\circ}\text{C}$ .
- D732 Método de Prueba para Determinar el Esfuerzo Cortante de los Plásticos mediante un martillo.
- D790 Métodos de Prueba para Determinar las Propiedades a Flexión de Plásticos Reforzados y No Reforzados Plásticos y Materiales para Aislamiento Eléctrico.
- D792 Métodos de Prueba para Determinar la Gravedad Específica y la Densidad de los Plásticos mediante Desplazamiento.
- D953 Método de Prueba para Determinar el Esfuerzo de Carga de los Plásticos. D2563 Práctica Recomendada para la Clasificación Visual de Defectos en Láminas de Fibras de Refuerzo de Vidrio con Plásticos.
- D3039 Método de Prueba para Determinar las Propiedades de Tensión de los Compuestos de Fibras con Resina.

- D3165 Método de Prueba para Determinar las Propiedades de Esfuerzo de los Adhesivos a Carga a Cortante Mediante Carga a Tensión.
- D3418 Método de Prueba Estándar para Determinar las Temperaturas de Transición de los Polímeros Mediante Análisis Térmico.
- D3528 Método de Prueba para Determinar las Propiedades de Esfuerzo de los Adhesivos a Cortante Mediante Carga a Tensión.
- D4065 Práctica Estándar para Determinar y Reportar las Propiedades Mecánicas Dinámicas de los Plásticos.
- D4541 Método de Prueba Estándar para Determinar el Esfuerzo de los Recubrimientos Mediante el Equipo de Prueba de Adhesión Portátil.
- E 84-94 Método de Prueba para Determinar las Características de las superficies incendiadas en Materiales de Construcción.

*International Conference of Building Officials (ICBO)*

- AC125 Criterio para el Reforzamiento de Concreto y Mampostería no Reforzada Utilizando Sistemas de Compuestos de Fibras de Refuerzo, Abril, 1997.

*Otros*

- SACMA Métodos Recomendados, Asociación de Distribuidores de Materiales Compuestos, 1994.

Métodos de Prueba Estándar para Barras y Láminas FRP, Publicado por ISIS Canadá y la Universidad de Manitoba, Canadá, 1998.

# B

## GUIA DE PRODUCTORES

| Materiales FRP |                       |                                 | Productos FRP                   |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                    |
|----------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| Resina         | Resina: Resinly Holda | Resina: Resinly Holda: Sandwich |                                    |
|                | X                     |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               | ATK, Inc.                          |
|                | X                     |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | ATP                                |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | A & P Technology, Inc.             |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               |                                 | X                               | Am - Cor Industrial Plastics, Inc. |
| X              |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Amco                               |
| X              |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Ad-Tech Chemical Company           |
|                |                       | X                               |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Baltak Corporation                 |
| X              |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | BP Armo Co.                        |
|                | X                     |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Brunswick Technologies Inc.        |
|                | X                     |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Clark Technical Tech. Fab. Company |
|                |                       |                                 |                                 |                                 | X                               |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               | Composite Repair Technology, Inc.  |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Composite News International       |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               |                                 |                                 |                                 | X                               | Comptek Structural Composites      |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               | X                               | Composite Systems, Inc.            |
| X              |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Coak Composites and Polymers       |
|                |                       |                                 | X                               |                                 |                                 | X                               |                                 | X                               |                                 |                                 | Creative Filtration, Inc.          |
| X              |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Dow Chemical Company               |
|                |                       |                                 | X                               |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               | E.I. DuPont                        |
| X              |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Eastman Chemical Company           |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               | Edwards Engineered Co., Inc.       |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               | Epoxytech                          |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               |                                 |                                 |                                 | X                               | Epoxytech                          |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Eyle Company                       |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               | García Jaque Ingenieros            |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               | X                               |                                 | Gestetek, Inc.                     |
|                |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | X                               | X                               |                                 | Glasterns, Inc.                    |
| X              |                       |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 |                                 | Gougeon Brothers, Inc.             |

