



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
INGENIERÍA DE
EDIFICACIÓN

ESTRUCTURAS DE HORMIGON PRETENSADO ARMADAS CON FRP (Fibers Reinforcement Polymers).

ALUMNO: JOSÉ MANUEL GARCÍA POLO

TUTORA: MILAGRO IBORRA LUCAS

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS

ARQUITECTURA TÉCNICA

CURSO 2012/2013

“En esta breve reseña me gustaría dedicar este trabajo final de carrera a todas aquellas personas que me han apoyado a lo largo de todos estos años en la universidad, tanto a mis padres y hermano, a mi pareja Merche y a mis amigos que me han animado a continuar y finalizar mis estudios. También agradecer a los profesores de los que he tenido el placer de aprender así como de mi tutora de proyecto Milagro Iborra que me ha ayudado a llevar a cabo este proyecto.”

Contenido

1	Introducción.	4
2	Objetivos.....	6
3	El material FRP (Fiber Reinforced Polymers).....	7
3.1	Matriz polimérica. Resinas	9
3.1.1	Resinas termoendurecidas o termoestables.....	9
3.1.2	Resinas termoplásticas	11
3.2	Las fibras.....	12
3.2.1	Fibras de vidrio.	14
3.2.2	Fibras de carbono.....	15
3.2.3	Fibras de aramida.	15
3.2.4	Fibras de basalto.....	16
3.3	Propiedades de las barras FRP	17
3.3.1	Proceso de fabricación.	17
3.3.2	Masa específica.	17
3.3.3	Dilatación térmica.	17
3.3.4	Resistencia a tracción longitudinal.....	18
3.3.5	Módulo de elasticidad a tracción.	19
3.3.6	Resistencia a compresión, (longitudinal).	19
3.3.7	Módulo de elasticidad a compresión.	19
3.3.8	Resistencia al cizallamiento.....	19
3.3.9	Fatiga.	19
3.4	Factores que afectan a las propiedades mecánicas de las barras FRP.....	20
3.4.1	Humedad.	20
3.4.2	Fuego y temperatura.....	20
3.4.3	Rayos ultravioleta.....	20
3.5	Formas y tipos	21

4	Hormigón pretensado con FRP.....	26
4.1	El hormigón pretensado como material de construcción.....	26
4.2	Desarrollo histórico del pretensado con FRP.	29
4.3	Esfuerzos investigadores.....	32
4.3.1	Estandarización y recomendaciones de diseño.....	32
4.3.2	Informes y estados del arte.....	33
4.3.3	Anclajes.....	33
4.3.4	Durabilidad	34
4.3.5	Tendones externos y no adheridos	34
4.3.6	Comportamiento estructural.....	34
4.3.7	Adherencia.....	34
4.3.8	Aplicaciones.....	34
4.3.9	Esfuerzos individuales	35
4.4	Guías de diseño y comités técnicos.....	35
4.4.1	Europa.	35
4.4.2	Estados Unidos.	35
4.4.3	Canadá.....	36
4.4.4	Japón.	36
4.5	Tendones y anclajes.	37
4.5.1	Tendones comerciales.....	37
4.5.2	Descripción de los tendones.	38
4.5.3	Caracterización de los anclajes.....	39
4.5.4	Modos de fallo de los anclajes.	44
4.6	Comportamiento a flexión	45
4.6.1	Consideraciones generales.....	45
4.6.2	Metodología del diseño a resistencia.....	47
4.6.3	Diseño a flexión y capacidad de predicción.	48
4.6.4	Coefficiente de minoración de resistencia para flexión	48

4.6.5	Tensión de servicio en flexión	48
4.6.6	Tensión de tesado	49
4.6.7	Rotura por fluencia lenta de los tendones.	49
4.6.8	Pérdidas por relajación y fricción	51
4.6.9	Aproximación global al diseño	52
4.6.10	Ductilidad o defomabilidad	52
4.6.11	Refuerzo mínimo	54
4.7	Servicio	54
4.7.1	Flecha.....	54
4.7.2	Ancho y espaciado de las fisuras.	55
4.7.3	Fatiga	55
4.8	Comportamiento a largo plazo.....	56
4.9	Cortante.....	57
4.10	Adherencia y desarrollo	58
4.10.1	Introducción.	58
4.10.2	Longitud de transferencia	60
4.10.3	Recomendaciones de diseño.....	61
4.11	Tendones no adheridos y sistema de tendones externo.	61
4.11.1	Elementos pretensados no adheridos.....	61
4.11.2	Pretensado externo	62
4.12	Necesidades de investigación.	65
4.13	Demostraciones de campo y construcciones.....	66
5	Parte experimental.....	71
6	Conclusiones.....	75
7	Bibliografía.....	76

1 Introducción.

El hormigón pretensado como técnica estructural tiene su origen primario en el deseo de resolver un problema concreto planteado en el hormigón armado: la existencia de fisuración. Ello se vio favorecido por otra circunstancia ligada a la tecnología de materiales: la aparición paulatina de hormigones y aceros de alta resistencia (Juan 2010).

La idea de evitar la fisuración, que siempre aparece en mayor o menor medida en el hormigón armado desde sus comienzos, condujo a pensar en el pretensado. Sometiendo previamente a compresión al hormigón, mediante tesado de armaduras de acero ancladas sobre el propio hormigón. De esta forma, bajo las cargas permanentes y las de uso se podrían evitar las tracciones y, por tanto la aparición de fisuración del hormigón.

El gran problema de las estructuras de hormigón tanto armado como pretensado es la corrosión del acero lo que conlleva un enorme gasto de mantenimiento. Ello nos lleva a buscar un material con las mismas o mejores características resistentes del acero pero sin las desventajas propias del mismo, es decir, la oxidación y todo lo que ella conlleva. En este contexto es donde aparecen las barras de polímeros reforzados con fibras (FRP, Fiber Reinforced Polimer). Con este material se pueden diseñar estructuras que resistan las cargas solicitadas sin alterar la geometría y las dimensiones de la misma.

Este tipo de tendones se caracterizan por tener una alta relación resistencia/peso, una alta resistencia a la fatiga y una baja pérdida de resistencia por relajación. Además, a causa de sus propias características de material, no se corroe. Son anisótropos y prácticamente su composición determina la capacidad resistente del sistema.

Los materiales compuestos FRP presentan un comportamiento frágil, por ello, combinados con el hormigón pueden ofrecer un compuesto de altas prestaciones con un comportamiento poco dúctil. La elevada resistencia a tracción de este material y su relativo bajo módulo de elasticidad hacen pensar que la mejor forma de combinarlo con el hormigón es mediante la técnica del pretensado.

Las barras de FRP son un material compuesto, que según su definición es *“la combinación de dos o más materiales diferentes, que presentan propiedades mecánicas y físicas especiales en donde se combinan las mejores propiedades de sus componentes suprimiendo sus defectos”* (Iborra 2009). Inicialmente desarrollados en los campos de la industria del motor y aeroespacial los materiales compuestos

Además de los significativos beneficios si se relaciona coste y durabilidad otras ventajas de este material son la alta resistencia a tracción y rigidez en relación al peso, alta resistencia a la fatiga, resistir a la corrosión y el ataque químico, una expansión térmica controlable, y unas condiciones de amortiguación y neutralidad electromagnética mayores a las de otros materiales. No presentan rama plástica en el diagrama esfuerzo-deformación, por lo que se consideran materiales prácticamente elásticos hasta la rotura(Quayyum 2010).

El presente proyecto final de carrera tratará el caso concreto de las barras poliméricas en Hormigones Pretensados, para ello se realizará un revisión bibliográfica con el objeto de conocer los antecedentes y el estado actual de los conocimientos científico técnicos, guías de diseño editadas para tal fin, grupos de trabajo de investigación, estructuras de hormigón pretensado realizadas con FRP y disponer de una base de datos bibliográficos.

2 Objetivos.

El objetivo del presente Proyecto Final de Carrera (PFC) es la actualización del estado del conocimiento del uso de hormigón pretensado con barras de refuerzo formadas por materiales compuestos a base de fibras de Carbono, Aramidas o Vidrio y una matriz formada por resinas poliméricas a base de Poliéster, Vinyl Éster o Epóxi, conocidas como barras FRP (Fiber Reinforced Polymer), designándose CFRP, AFRP y GFRP, según sean de Carbono, Aramidas o Vidrio respectivamente.

Para la consecución de dichos objetivo del presente trabajo de investigación se describen a continuación:

- Recopilación y repaso de la bibliografía correspondiente al campo de estudio de las barras poliméricas FRP en el uso del hormigón pretensado.
- Exponer una base de datos bibliográfica, los principales grupos de investigación, exponer la normativa internacional en referencia al objeto del estudio del proyecto, exponer una relación de conclusiones obtenidas de los últimos conocimientos del ámbito de investigación y una recopilación de las principales aplicaciones del uso de los FRP en hormigón pretensado.

3 El material FRP (Fiber Reinforced Polymers).

El material FRP del inglés Fiber Reinforced Polymers, es decir fibras reforzadas con polímeros, se trata de un material compuesto, un composite. El material contiene principalmente fibras de alta resistencia embebidas en una matriz de resina polimérica. Las fibras dan al conjunto resistencia y rigidez para soportar la carga aplicada mientras que la matriz polimérica (normalmente de resinas epoxi o poliésteres) tiene la función de unir las fibras y protegerlas.

Las funciones de la matriz son las siguientes:

- Unir las fibras
- Proteger su superficie de daños durante su manipulación, fabricación o en su vida útil
- Dispersarlas y mantenerlas separadas
- Transferir la tensión a las fibras

Para que mantenga su estabilidad a lo largo del tiempo debe ser química y térmicamente compatible con las fibras. Cabe destacar su importancia en varios aspectos del comportamiento global de la barra como son:

- el control global de la tensión-deformación.
- resistencia a ambientes corrosivos.
- Afecta el mecanismo de fallo.
- A la tenacidad el composite.

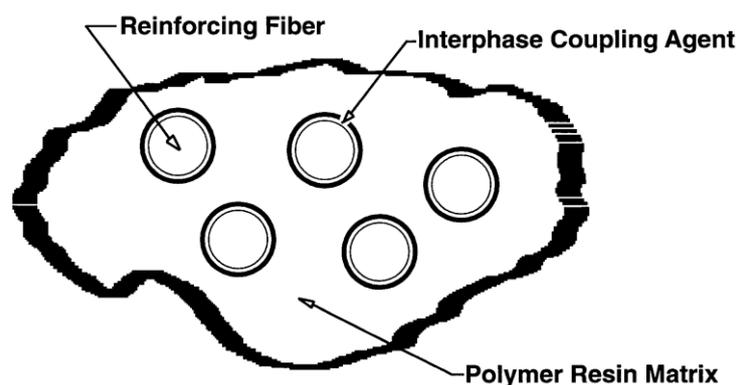


Figura 3.1 . Estructura del composite a nivel micro-mecánico (ACI 440R-96 1996)

Con respecto al proceso de fabricación de las barras el método más usual es el de la pultrusión que es un proceso productivo de conformado de materiales plásticos para obtener perfiles de plástico reforzado, de forma continua, sometiendo las materias primas a un arrastre y parado por operaciones de impregnado, conformado, curado y corte. Las fibras se utilizan en forma de hilos que viene arrolladas en bobinas.

Las resinas más comúnmente utilizadas para el proceso son las epoxy o viniléster.

En la Figura 3.2 se puede ver un esquema del proceso de fabricación en el que las fibras enrolladas en bobinas se van uniendo y se impregnan en un baño de resina y posteriormente pasan por un proceso de presión y temperatura en un autoclave para conformar la forma final.

El número de combinaciones entre fibra y resina son grandes dependiente de cuál es la combinación y de las proporciones de las materias variaran las propiedades mecánicas de las barras de FRP.

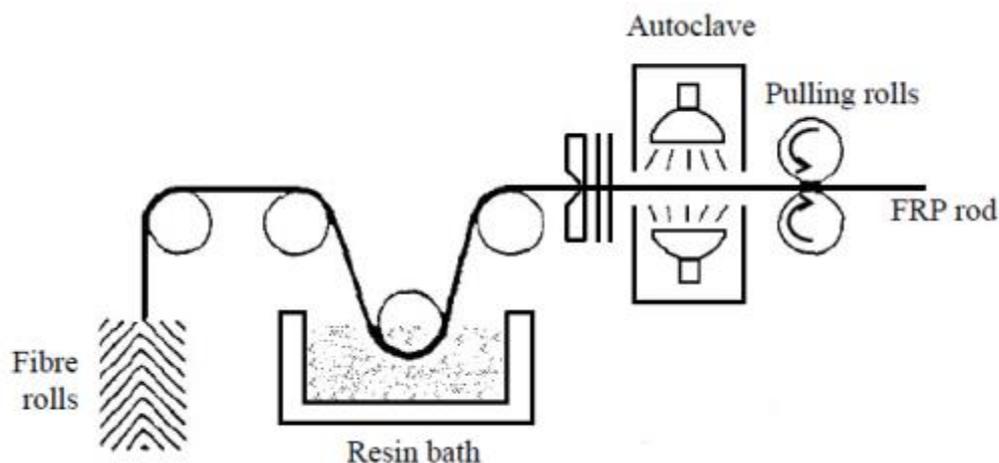


Figura 3.2 Esquema de fabricación de barras por pultrusión (Ram, 2008)

De entre los factores que afectan a la fabricación de los FRP son de especial importancia son la temperatura y la humedad en el momento del vertido de la resina sobre las fibras. Por ejemplo, con variaciones de temperatura del orden de 10 °C pueden provocar que el endurecimiento de la resina se prolongue incluso al doble del tiempo que en un principio se preveía (Tibbetts, 2008).

El otro factor importante, la humedad relativa y la humedad de la propia fibra, puede provocar que la conexión fibra-resina sea muy pobre

Estos factores (humedad y temperatura) no son un grave problema cuando se fabrican las barras en fábrica, donde se pueden controlar fácilmente estas variables. Aunque la temperatura es una variable crítica como se ha mencionado, no es así cuando el conjunto se ha enfriado y está endurecido, siendo tan estable que tan solo temperaturas del orden de un incendio podría afectarle (Benavent Serra 2012)

3.1 Matriz polimérica. Resinas

La matriz polimérica puede ser considerada como tanto como un componente estructural como un componente de protección de las fibras

Utilizamos el término resina para designar el polímero durante el proceso de fabricación, una vez el polímero ya ha curado lo designamos como matriz (Fib bulletin 40 2007).

Las resinas tienen la función de transmitir a las fibras los esfuerzos aplicados sobre el conjunto aunque sólo una parte pequeña del esfuerzo es soportado por es resistido exclusivamente por la matriz de resina.

Las características que debe tener la resina son:

- Debe ser ductil
- Módulo elástico menor que el de la fibra.
- El volumen de la resina con respecto al total debe ser de entre el 30 y el 60%

Además la matriz, como ya hemos comentado antes, debe proteger a las fibras del deterioro superficial ya que en las condiciones de trabajo del conjunto fibra-resina esto podría producir un fallo prematuro por la aparición de grietas. Como la matriz además de mantener unidas fibras las mantiene separadas unas de otras consigue que aunque se rompa alguna de las fibras la barra no falle hasta que se rompan un gran número de ellas.

Es muy importante el factor de adherencia entre el binomio fibra-matriz, cuanto mayor sea éste, la respuesta a tracción lo será también. El motivo es que la adecuada unión favorece la transmisión de esfuerzos.(Benavent Serra 2012)

Las resinas que suelen utilizarse para la fabricación de barras FRP son de dos tipos:

- Resinas termoestables
- Resinas termoplásticas.

3.1.1 Resinas termoendurecidas o termoestables

Las resinas termoestables son aquellas materias poliméricas que por la acción del calor o mediante endurecedores apropiados, endurecen de forma irreversible

Estos polímeros tienen fuertes enlaces entre las moléculas y dentro de las mismas moléculas. Desarrollan una estructura en red tridimensional que les confieren su forma y si son calentados después de haber sido curados no se reblandecen y mantiene su forma hasta que comienzan a descomponerse a altas

temperaturas. Esta propiedad de no fundir ni reblandecerse cuando se eleva la temperatura hace que presenten buenas propiedades a altas temperaturas. Además de esta propiedad otras de las propiedades que presenta, entre otras, son:

- Alta resistencia química
- Rigidez
- Dureza superficial
- Buena estabilidad dimensional

Las resinas termoplásticas tienen inicialmente una baja viscosidad permitiendo incorporar grandes volúmenes de fibra. Los termoplásticos son fáciles de fabricar.

Los acabados de las resinas termoestables comparado con los acabados de la mayoría de termoplásticos son pobres debido a que son bastante opacos y suelen tener una coloración amarillenta.

Los polímeros termosestables más comúnmente utilizados para la fabricación de barras de frp son las resinas de polyester, epoxy y vinyl-ester.

Resinas epoxy:

Ventajas	Desventajas
Altas prestaciones mecánicas	Alto coste
Fácil procesado	Largo periodo de curado
Baja retracción durante el curado	
Buena adherencia a las fibras	
Alta resistencia a la corrosión	
La resina menos afectada por el agua y el calor	

Tabla 3.1 Ventajas desventajas resinas epoxy

Resinas de poliéster

Ventajas	Desventajas
Alta resistencia a la corrosión	Alto volumen de retracción

Tabla 3.2 Ventajas desventajas resinas poliéster

Las resinas Vinyl-ester son una combinación de las dos anteriores

Ventajas	Desventajas
Alta resistencia química	Retracción más alta que el epoxy
Alta resistencia a la tracción	
Rápido curado	
Resistentes a los ácidos y alcalis	

Propiedades	Matriz		
	Poliéster	Epoxi	Vinilester
Densidad (Kg/m ³)	1200-1400	1200-1400	1150-1350
R. tracción (MPa)	34,5-104	55-130	73-81
Módulo longitudinal (GPa)	2,1-3,45	2,75-4,1	3,0-3,5
Coefficiente de Poisson	0,35-0,39	0,38-0,40	0,36-0,39
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /°C)	55-100	45-65	50-75
Contenido de humedad (%)	0,15-0,6	0,08-0,15	0,14-0,30

Tabla 3.3 Propiedades de matrices termoestables (Fib bulletin 40 2007)

3.1.2 Resinas termoplásticas

Las resinas termoplásticas se reblandecen desde el estado sólido para ser procesadas en caliente y después vuelven a su estado una vez que se han enfriado completamente. Los termoplásticos no sufren ninguna transformación química durante este proceso, es decir no tienen curado. Tienen una alta viscosidad durante el calentamiento y son difíciles de procesar. Hay que tener especial cuidado para mejorar el contacto entre las fibras y la matriz.

Las resinas termoplásticas obtienen su resistencia y rigidez de las propiedades inherentes a las unidades monoméricas y de su peso molecular muy elevado. Hay diferentes tipos de matrices termoplásticas, las PEEK, polyether ether Ketone, es la más común por su alto rendimiento. Tiene una alta tenacidad, tiene un porcentaje de absorción de agua muy bajo (0.5% de su peso, aprox.) a temperatura ambiente. Las resinas PPS, Polyphenylene sulphide, tiene una muy buena resistencia química. Y las resinas PSUL, polysulfone, es un termoplástico con una gran deformación al fallo y una excelente estabilidad bajo condiciones de calor y humedad (Iborra 2009).

En la tabla siguiente se dan las propiedades de los termoplásticos citados

Propiedades	Matriz		
	PEEK	PPS	PSUL
Densidad (Kg/m ³)	1320	1360	1240
R. tracción (MPa)	100	82,7	70,3
Módulo de tracción (GPa)	3,24	3,30	2,48
Deformación de tracción (%)	50	5	75
Coefficiente de Poisson	0,40	0,37	0,37
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /°C)	47	49	56

Tabla 3.4 Propiedades de matrices termoplásticas (Fib bulletin 40 2007)

3.2 Las fibras.

Dentro del material compuesto que es el FRP utilizamos las fibras por su dureza, rigidez y ligereza. Las fibras son más resistentes que el material a granel que las constituye debido a la orientación preferencial de las moléculas a lo largo de la dirección de la fibra y a causa del reducido número de defectos de la fibra comparado con los defectos presentes en los materiales a granel. (Fib bulletin 40 2007)

Los requisitos tanto estructurales como funcionales exigibles a las fibras son:

- Alto módulo elástico para un eficiente uso como refuerzo
- Alta resistencia última
- Baja variación de la resistencia entre fibras individuales
- La estabilidad de sus propiedades durante su manipulación y fabricación
- Uniformidad del diámetro de la fibra y su superficie
- Alta tenacidad; durabilidad
- Disponibilidad en formas adecuadas
- Coste aceptable.

Para la confección de barras de refuerzo de FRP las fibras utilizadas son:

- Aramida
- Carbono
- Vidrio
- Basalto

Como podemos comprobar en la Figura 3.3 donde se representa el diagrama tensión deformación de las fibras el comportamiento de las mismas es perfectamente elástico. Es decir, hay proporcionalidad directa entre tensiones y deformaciones no mostrando ninguna rama plástica en el diagrama.

Si un material es isotrópico las propiedades del mismo no dependen de la dirección en que comprobemos dicha propiedad. Este es el caso de las fibras de vidrio y las de basalto. De manera contrario las fibras de carbono y aramida son anisotrópicas, es decir la propiedad mecánica depende de la dirección en que la midamos.

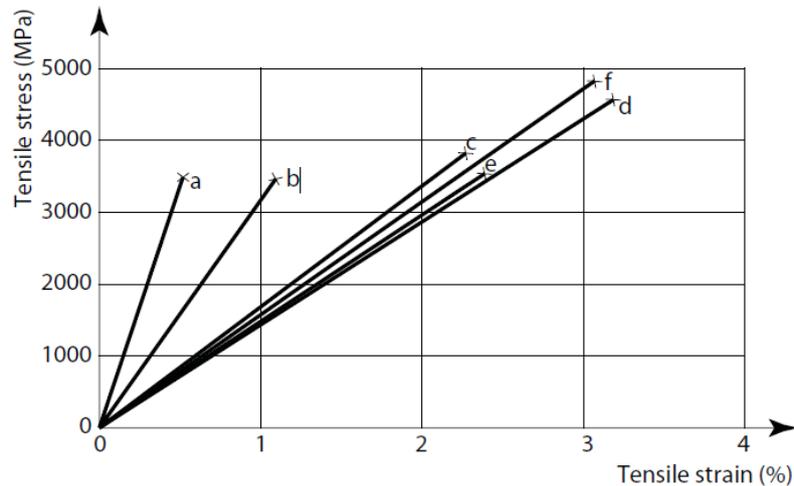


Figure 2-1: Stress-strain curves of typical reinforcing fibres: a) carbon (high modulus); b) carbon (high strength); c) aramid (Kevlar 49); d) S-glass; e) E-glass; f) Basalt

Figura 3.3 Diagrama tensión-deformación de distintas fibras (Fib bulletin 40 2007)

A continuación se comentan las principales características de distintos tipos de fibras y matrices poliméricas utilizados para realizar FRP. Los valores finales de cada material los determinará cada fabricante, no obstante se pueden tomar como valores tipo los que se presentan en las tablas siguientes tomadas del documento FIB Bulletin 40.

Fibre Type	Density	Tensile strength	Young modulus	Ultimate tensile strain	Thermal expansion coefficient	Poisson's coefficient
	(kg/m ³)	(MPa)	(GPa)	(%)	(10 ⁻⁶ /°C)	
E-glass	2500	3450	72.4	2.4	5	0.22
S-glass	2500	4580	85.5	3.3	2.9	0.22
Alkali resistant glass	2270	1800-3500	70-76	2.0-3.0	-	-
ECR	2620	3500	80.5	4.6	6	0.22
Carbon (high modulus)	1950	2500-4000	350-650	0.5	-1.2...-0.1	0.20
Carbon (high strength)	1750	3500	240	1.1	-0.6...-0.2	0.20
Aramid (Kevlar 29)	1440	2760	62	4.4	-2.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramid (Kevlar 49)	1440	3620	124	2.2	-2.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramid (Kevlar 149)	1440	3450	175	1.4	-2.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramid (Technora H)	1390	3000	70	4.4	-6.0 longitudinal 59 radial	0.35
Aramid (SVM)	1430	3800-4200	130	3.5	-	-
Basalt (Albarrie)	2800	4840	89	3.1	8	-

Tabla 3.5 Propiedades de los distintos tipos de fibra (Fib bulletin 40 2007)

3.2.1 Fibras de vidrio.

Las fibras de vidrio son las de uso más común para la fabricación de compuestos de matriz polimérica, siendo además las de menor coste.

Las principales características de las barras fabricadas con fibra de vidrio son.

- Buena relación resistencia/peso
- Buena estabilidad dimensional
- Buena resistencia al calor
- Buena resistencia al frío
- Resistencia a la corrosión
- Propiedades aislantes eléctricas.

Las clases de fibra de vidrio utilizadas para la fabricación de los composites son:

a) Vidrios E (eléctricos)

Son los más baratos. Se trata de un vidrio de borsilicato de calcio y aluminio

Se reduce la resistencia a tracción de las fibras a temperaturas elevadas, sin embargo se puede considerar constante para el rango de temperaturas a las cuales va a utilizarse.

Sufre reducciones por corrosión química a lo largo del tiempo y bajo cargas sostenidas.

Resistencia a tracción 3,44 GPa

Módulo de elasticidad de 72,3 GPa

El más utilizado en la fabricación de fibras continuas.

b) Vidrios S (de alta resistencia)

Son de mayor coste que los vidrios E

Relación resistencia peso más alta.

Utilización principalmente en aplicaciones militares y aeroespaciales.

Resistencia a tracción 4,48 GPa

Módulo de elasticidad de 85,4 GPa

Diámetros de las fibras entre 8 y 15 μm

c) Vidrios Alkali-resistentes (AR).

Se le añade zirconio para que sea más resistente al ataque alcalino del cemento (pH alrededor de 13) por lo que también son más caros..

La estructura tridimensional de los óxidos que constituyen los vidrios determinará la resistencia y el módulo elástico del mismo. Las fibras de vidrio tienen propiedades isotrópicas, de forma que el módulo de Young a lo largo del eje de la fibra es el mismo que transversalmente al eje, ello es consecuencia directa de la estructura tridimensional de la red del vidrio (Fib bulletin 40 2007).

Durante la fabricación las fibras de vidrio están recubiertas por unos agentes de acoplamiento que crean una capa flexible en la interfase mejorando la resistencia de adherencia y reduciendo el número de fallos del material. .

3.2.2 Fibras de carbono.

Hay que distinguir entre fibras de carbón y fibras de grafito, aunque las dos sean de carbono hay algunas diferencias significativas entre ambas, principalmente en cuanto a su estructura modular. Mientras que en el grafito los átomos de carbón se disponen en planos cristalográficos paralelos de hexágonos regulares, mientras que en las fibras de carbono la adherencia entre las capas es débil, por eso que tiene una ordenación bidimensional.

Las de grafito tienen un mayor módulo de elasticidad que las de carbón. Las fibras de carbón presentan una alta resistencia y rigidez, y en general cuando el módulo de elasticidad aumenta la resistencia a tracción última y fallo por alargamiento decrece. Son altamente resistentes a factores ambientales agresivos. Las fibras de carbón presentan un comportamiento elástico fallando de manera frágil.

La principal desventaja de este tipo de fibra es su alto coste, siendo entre 10 y 30 veces más caras que las fibras de vidrio tipo E.

Las fibras de carbono tienen una alta resistencia y alto módulo de elasticidad.

Así pues, el módulo de elasticidad de las fibras de carbono dependerá del grado de perfección de la orientación, la cual varía considerablemente con las condiciones y proceso de fabricación.

3.2.3 Fibras de aramida.

Las características más destacadas de estas fibras son su alta resistencia y módulo de elasticidad, como resultado de una alineación de la cadena de polimérica a lo largo del eje de la fibra durante el proceso de fabricación, hilado y estirado. (Iborra 2009)

Aramidas es un término genérico para un grupo de fibras orgánicas, producidas por varios fabricantes, quizá las más conocidas son las fabricadas por DuPont y conocidas como s Kevlar, Kevlar 29 (para protección balística, cuerdas y cables), la Kevlar 49 (usado para reforzar plásticos en materiales compuestos para

aplicaciones aeroespaciales, marina automoción y otras aplicaciones industriales) y Kevlar 149 (el de más alto módulo elástico entre todas las fibras de aramida disponibles).

Características fibras de Kevlar;

- comportamiento frágil en tracción
- bajo cargas de compresión es dúctil y absorbe gran cantidad de energía.
- resistencia compresión de las fibras Kevlar es menos que el 20% de su resistencia a tracción
- Con la temperatura la resistencia y el módulo de las fibras de Kevlar decrecen linealmente, pero retiene más del 80% de su resistencia original a 180 °C.
- Con la temperatura la resistencia y el módulo de las fibras de Kevlar decrecen linealmente, pero retiene más del 80% de su resistencia original a 180 °C.
- Absorben algo de agua dependiendo del tipo de fibra
- Son sensibles a los rayos ultravioleta.
- Sufren degradación por el ataque de ácidos y álcalis..

3.2.4 Fibras de basalto.

Las fibras de basalto se obtienen por la fundición de lava volcánica.

Tienen mejores propiedades físico-mecánicas que las fibras de vidrio, pero significativamente más baratas que las fibras de carbono. Las principales ventajas de las fibras de basalto son:

- Resistencia al fuego,
- capacidad al aislamiento acústico y a la vibración y
- resistencia ambientes químicos agresivos.

La temperatura de trabajo de 982 °C y el punto de fusión de 1450 °C hacen que sea un material de aplicación cuando se demande resistencia al fuego. La investigación de las fibras de basalto, como refuerzo estructural en estructuras de hormigón, está todavía en fase de desarrollo

3.3 Propiedades de las barras FRP

3.3.1 Proceso de fabricación.

Las barras de FRP son fabricadas por Pultrusión, produciendo barras de sección transversal constante. Los filamentos de fibra son sometidos a un baño con resina. Después se estiran para formar el perfil. El proceso de pultrusión se realiza a una velocidad de 0.9 m/min, dependiendo del tamaño de la sección transversal de la barra (ACI 440R-96 1996).

Para aumentar la adherencia con el hormigón se pueden seguir diferentes técnicas como son:

- Deformaciones superficiales en la barra antes del endurecimiento final
- Enrollado de filamentos de en forma helicoidal.
- Entallado en la barra
- Enrollamiento con un film texturizado
- Agregado en la superficie de áridos finos para aumentar la rugosidad exterior.

Las propiedades mecánicas de las barras FRP van a variar significativamente dependiendo de:

- Tipo de resina y fibra
- La orientación de esta
- Efectos dimensiones
- Control de calidad en la producción.

Como otros elementos estructuras, también se ven afectadas por el tipo de carga y su duración, por la temperatura y por la humedad. (ACI 440R, 1996).

3.3.2 Masa específica.

La masa específica de las barras de FRP varía de 1.5 a 2 g/cm³, y para las barras de acero este valor es de 7.9 g/cm³, ello contribuye a una reducción de costes de transporte y manipulación del material.

Densidades de barras (g/cm ³)			
Acero	GFRP	CFRP	AFRP
7,90	1,25 a 2,10	1,50 a 1,60	1,25 a 1,40

Tabla 3.6 Masa específica de distintos FRP (ACI 440.1R-03 2003)

3.3.3 Dilatación térmica.

Los valores de la dilatación térmica variarán en función de la proporción de resinas y fibras del compuesto.

Coeficiente de dilatación térmica para barras de refuerzo				
Dirección	CTE $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$			
	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Longitudinal	11,7	6,0 a 10,0	-9,0 a 0,0	-6 a -2
Transversal	11,7	21,0 a 23,0	74,0 a 104,0	33,3 a 44,4

Tabla 3.7 Coeficiente de dilatación térmica (ACI 440.1R-03 2003)

3.3.4 Resistencia a tracción longitudinal.

Las barras FRP presentan un comportamiento elástico-lineal y una rotura brusca, sin aviso previo, como puede verse en el diagrama de tensión-deformación.

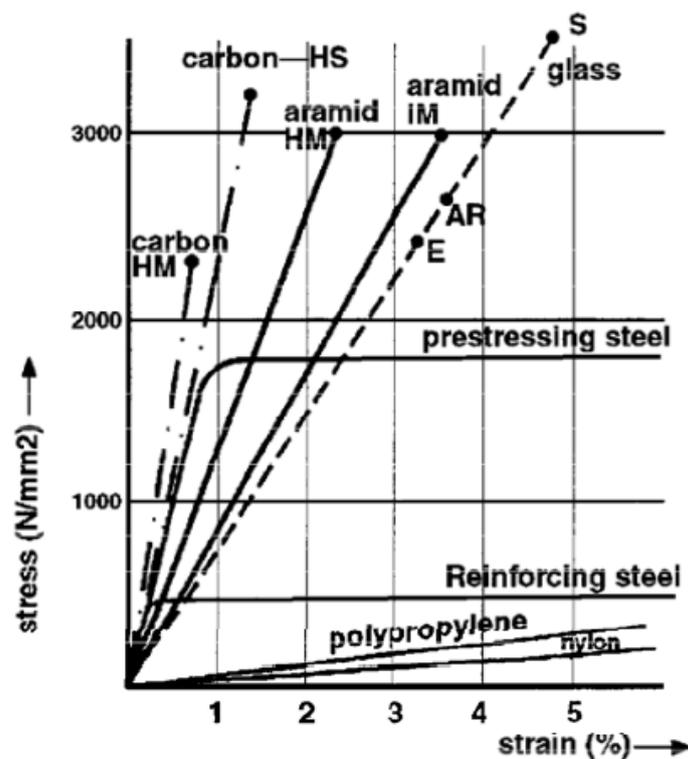


Figura 3.4 Diagrama tensión-deformación (ACI 440R-96 1996).

Según ACI 440 R 1996, la resistencia a tracción de las barras FRP, a diferencia de las de acero, es función del diámetro. Según el efecto "Shear Lag", las fibras localizadas próximas a la superficie de la barra están sometidas a mayores tensiones que las fibras del centro. Este fenómeno se traduce en una reducción de la eficiencia de la barra con diámetros mayores, según puede verse en la Tabla 3.8

Diámetro (mm)	Sección transversal (mm ²)	Resistencia a tracción (MPa)
9	71	900
13	127	740
16	198	655
19	285	620
22	388	585

Tabla 3.8 Resistencia a tracción de barras de FRP (Couto 2007)

3.3.5 Módulo de elasticidad a tracción.

El módulo de elasticidad de las barras GFRP es un 75% menor aproximadamente que el de las barras de acero, según ACI 440R (1996).

3.3.6 Resistencia a compresión, (longitudinal).

Las barras FRP no se comportan a compresión tan bien como lo hacen a tracción. Cuando las barras se someten a compresión, los modelos teóricos para resistencia a tracción no son válidos. La rotura, en muchos casos está asociada a la microfisuración de las fibras. Experimentalmente es muy difícil obtener valores de resistencia a compresión y dependen mucho de las propiedades de los materiales constituyentes y del volumen de fibras. La ruptura a compresión podrá estar en función de la microfisuración de la fibras, la sección transversal en virtud del efecto Poisson y del cizallamiento entre las fibras, según FIB 9.3 T.G, 2003.

3.3.7 Módulo de elasticidad a compresión.

Según ACI 440 R, 1996, el módulo de elasticidad a compresión de las barras GFRP es aproximadamente un 80% menor que el módulo de elasticidad de las barra de acero.

3.3.8 Resistencia al cizallamiento.

Esta resistencia es determinada por las propiedades de la matriz y por la distribución local de las tensiones que en general es baja.

Las barras FRP pueden ser fácilmente cortadas con una sierra común en la dirección perpendicular a las fibras.

3.3.9 Fatiga.

Las barras FRP poseen una alta resistencia a la fatiga. Según ACI 440 R, 1996, pueden soportar más de cuatro millones de ciclos de carga antes de iniciar la ruptura en la zona del anclaje.

3.4 Factores que afectan a las propiedades mecánicas de las barras FRP

3.4.1 Humedad.

Una absorción excesiva de agua en las barras puede resultar en una disminución considerable de la resistencia y la rigidez. La resina al absorber agua puede aumentar de volumen o deformar la barra. Existen resinas resistentes a la humedad, debiendo ser utilizadas cuando la estructura vaya a encontrarse de forma permanente en contacto con el agua o en situaciones de hielo/deshielo.

3.4.2 Fuego y temperatura.

En los compuestos de FRP el efecto de la temperatura es mayor en las resinas que en las fibras, las resinas contienen grandes cantidades de carbono e hidrógeno, que son inflamables.

El hormigón sirve como barrera para proteger las barras del contacto directo con las llamas. Con el aumento de la temperatura las barras se verán afectadas en la merma de su resistencia. Es importante que el usuario tenga conocimiento de las propiedades de las barras y el uso de las resinas a altas temperaturas.

3.4.3 Rayos ultravioleta.

Los rayos ultravioletas causan reacciones químicas en la matriz polimérica llevando a la degradación de sus propiedades, para evitarlo se deben incorporar a la resina aditivos adecuados. Cuando las barras están embebidas en el hormigón, lógicamente no se ven afectadas por no incidir los rayos de forma directa.

3.5 Formas y tipos

Varillas Corrugadas de Fibra de Vidrio



Características

- Varilla redonda de fibra de vidrio.
- No conducen electricidad.
- Muy resistentes.

Usos

- Estores.
- Construcción.

Notas

- Pueden fabricarse con resinas ortoftálicas, isoftálicas, viniléster o fenólicas.
- Pueden ser ignífugas, antiácidas, etc...

D (mm)	% Fibra	% Resina	R. Tensión (MPa)	Carga Máx (kN)	E (GPa)
6	<80%	<20%	825	27	35-41
8	<80%	<20%	760	46	35-42
12	<80%	<20%	655	100	35-43
16	<80%	<20%	655	142	35-44
19	<80%	<20%	620	183	35-45
22	<80%	<20%	586	224	35-46
25	<80%	<20%	550	296	35-47
32	<80%	<20%	480	388	35-48

Figura 3.5 Características de las barras Polymec (Benavent Serra 2012)

Barras, elementos y estructuras de refuerzo en fibra de vidrio por refuerzos permanentes



GLASSPREE®	Características		
peso específico	ASTM D 792	1.9	g/cm ³
contenido en vidrio	---	70	%
resistencia a la tracción	ASTM D 3916	750/1000	MPa
modulo elástico	ASTM D 3916	40	GPa
alargamiento a la rotura	ASTM D 3916	> 3	%
resistencia al corte	---	>100	MPa

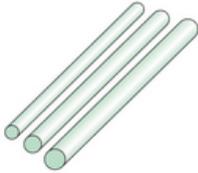
GLASSPREE®	Barra redonda		
		Mínimo (Código - FL 10)	Máximo (Código - FL 40)
	ø externo [mm]	10	40
	Resistencia a la tracción [kN]	75	850

Figura 3.6 Propiedades Glaspreee www.sireg.it/es



CARBOPREE® es una nueva línea de productos compuesta por barras y perfiles realizados con fibras de carbono impregnadas con resina vinil éster y superficie recubierta con arena de cuarzo.

Datos Técnicos - Fibra de Carbono

Carbopree®

CARBOPREE®	Características mecánicas						
	Carbopree Rod HS 7,5	Carbopree Rod HS 10	Carbopree Rod HS 12	Carbopree Rod HS 16	Carbopree Flat bar 25x2	Carbopree Flat bar 30x4	Carbopree Flat bar 40x5
Resistencia a la tracción	2300 MPa	2300 MPa	2300 MPa	2300 MPa	2300 MPa	2300 MPa	2300 MPa
Modulo de elasticidad	130 GPa	130 GPa	130 GPa	130 GPa	140 GPa	140 GPa	140 GPa
Diámetro	Ø 7,5 mm	Ø 10 mm	Ø 12 mm	Ø 16 mm	25x2 mm	30x4 mm	40x5 mm
Area nominal	44 mm ²	78 mm ²	113 mm ²	200 mm ²	50 mm ²	120 mm ²	200 mm ²
Carga ultima	100 KN	180 KN	260 KN	460 KN	125 KN	275 KN	450 KN
Deformacion última	1.80 %	1.80%	1.80%	1.80%	1.80%	1.80%	1.80%
Peso lineal	75 g/m	130 g/m	195 g/m	340 g/m	97 g/m	185 g/m	305 g/m

Figura 3.7 Propiedades Carbopree www.sireg.it/es

FORTIUS

Barras reforzadas de fibra de vidrio



Informaciones técnicas

Propiedades mecánicas

Esfuerzo de adhesión (bond stress) máximo determinado mediante una prueba de extracción (pull-out test):	11,6 MPa.	
Resistencia a la tracción:	655 MPa (barra Ø 16).	
Resistencia al corte:	140 MPa (barra Ø 16).	
Módulo de elasticidad a tracción:	40.800 MPa (acero: 210.000 MPa).	
Coefficiente de dilatación térmica (basado en ACI 440):		
en dirección transversal:	$21-23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	
en dirección longitudinal:	$6-10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	
Dureza Barcol	min. 60	(ASTM D2583)
Contenido de fibras de vidrio en peso	70% mínimo	(ASTM D2584)
Peso específico:	1,9 g/cm ³	(ASTM D792)

Típica curva esfuerzos-deformaciones para una barra reforzada de GFRP (el ejemplo se refiere a la dimensión de 12 mm).

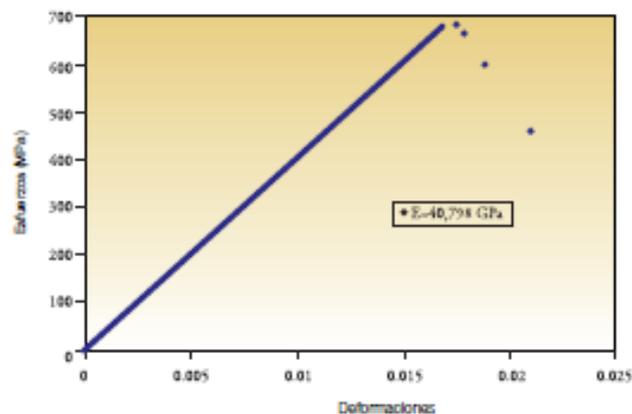


Figura 3.8 Características técnicas barra GFRP de Fortius www.fortius.be

FORTIUS

Aslan™ 100 GFRP

CARACTERISTICAS

INFORMACIONES TECNICAS.

(válidas para las barras de 16 mm de diámetro)	Procedimiento de prueba ASTM	Límite mínimo
Resistencia característica a la adhesión (<i>bond strength</i>)	Método del Estado de Pensilvania (<i>Penn State method</i>)	11,6 MPa
Resistencia característica a la tracción	D3916/D638	655 MPa
Resistencia característica al corte simple	D2344	140 MPa
Módulo de elasticidad a la tracción	D3916/D638	40800 MPa
Dureza Barcol	D2583	60
Resistencia dieléctrica	D149	14,4 kV/mm
Constante dieléctrica	D150	5,4
Resistencia al arco	D495	165 sec.
Contenido en peso de fibras de vidrio	D2584	75%
Densidad	D792	1995 kg/m ³
Absorción del agua	D570	0,05%
Coefficiente de dilatación térmica en sentido longitudinal	D696	6-10 x 10 ⁻⁶
Coefficiente de dilatación térmica en sentido transversal	D696	21-23 x 10 ⁻⁶

FORTIUS, BK International, Grasbos 50, B-3294 Diest, Belgium
 Tel: + 32 13 326873 Fax + 32 13 326874 e-mail: bki@pi.be

Figura 3.9 8 Características técnicas barra GFRP de Fortius www.fortius.be



Figura 3.10 Tipos de acabados de barras de FRP (Tourmeur 2007)

4 Hormigón pretensado con FRP.

4.1 Hormigón pretensado como material de construcción.

El hormigón por sí solo es un material que resiste bien a compresión (en torno a 30 N/mm^2 o MPa) aunque menos que el acero (que su resistencia a compresión está en torno a 400 N/mm^2) e incluso menos que la madera. Una característica del hormigón es su baja resistencia a tracción, del orden de 10 veces menor que la resistencia a compresión, hablando en términos poco precisos. Consideremos la viga fabricada exclusivamente con hormigón (sin acero) de la Figura 4.1. El valor máximo de la carga (q) que puede resistir la viga será aquella que origine una tensión de tracción igual a la resistencia a tracción del hormigón. Cuando esta carga se alcance la viga colapsará sin previo aviso.

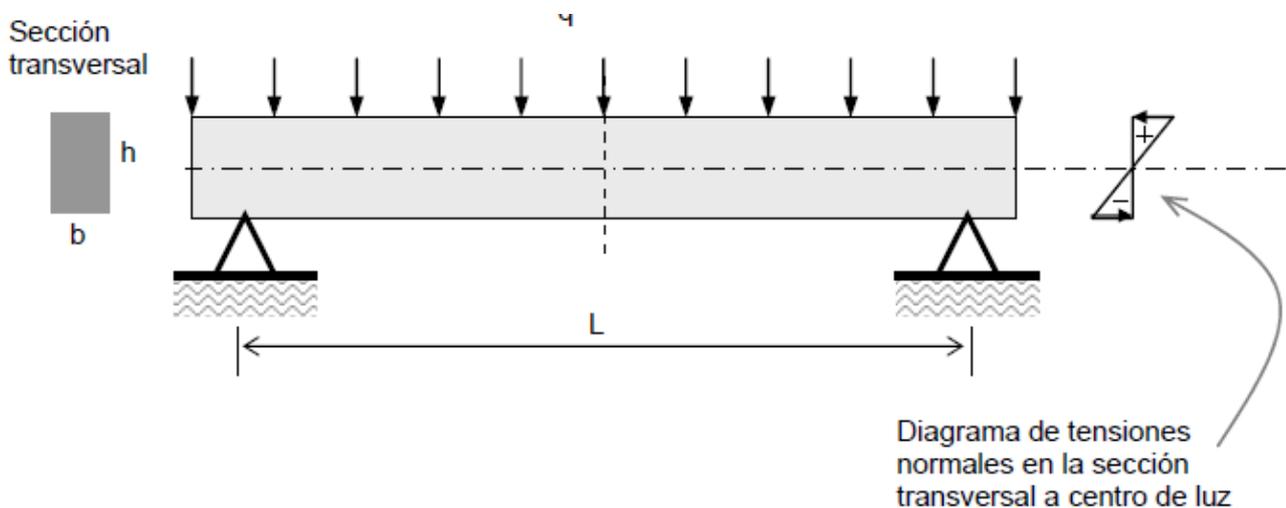


Figura 4.1 Viga de hormigón (Hernández-Montes, Gil-Martín 2007)

En la viga de la Figura 4.1 la rotura se producirá en las fibras inferiores, pues es en ellas donde se experimentan las máximas tracciones. Podemos fácilmente intuir que, en general, el empleo de hormigón sin armadura (hormigón en masa) no es adecuado. En el elemento estructural de la Figura 4.1 se está desaprovechando la capacidad de trabajo del hormigón a compresión ya que éste podría resistir tensiones mucho mayores. Además se está confiando en la capacidad de trabajo del hormigón a tracción que, dado que no se puede garantizar que el hormigón no tenga grietas que lo incapaciten para resistir esta sollicitación, es muy poco fiable.

Para mejorar los inconvenientes antes descritos se plantea la necesidad de introducir un material que resista a tracción lo que el hormigón no puede: el acero. Este material añadido debe colocarse en las zonas donde es más necesario (Figura 4.2) o sea, donde se desarrollan las tracciones. Al conjunto de ambos materiales trabajando de esta forma se le denomina hormigón armado.

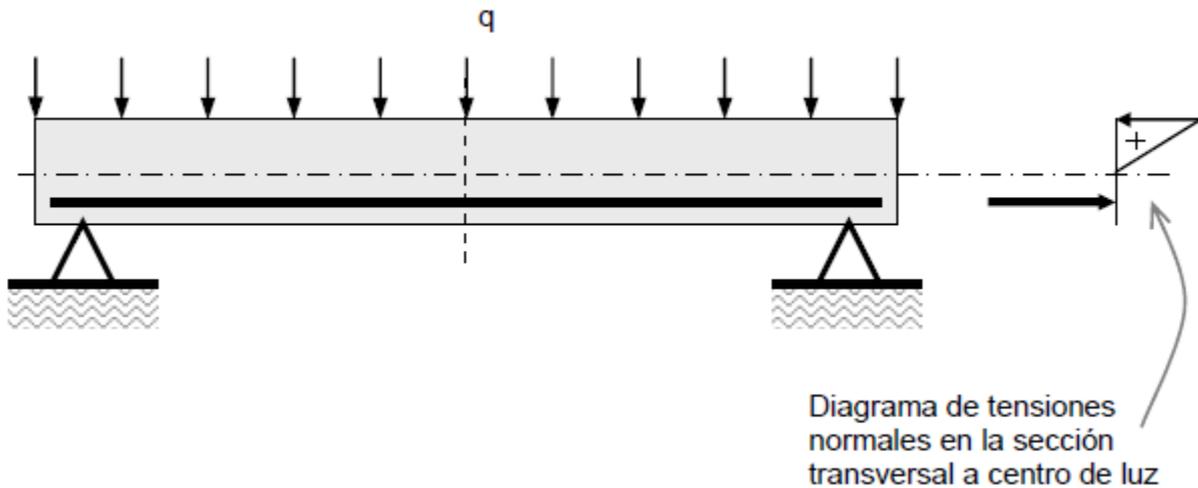


Figura 4.2 Viga de hormigón con acero en la zona de tracción. (Hernández-Montes, Gil-Martín 2007)

No se considera la colaboración del hormigón a tracción, tal y como se aprecia en el diagrama de tensiones simple), en toda sección transversal se debe cumplir que la resultante de las compresiones iguale a la resultante de las tracciones.

Con la aparición en el mercado aceros de alto límite elástico, aceros cuya resistencia a tracción es muy elevada (en torno a 2000 N/mm^2), se plantea la posibilidad de su empleo junto con el hormigón. Para ambos aceros, el de alto y bajo límite elástico, el módulo de elasticidad es siempre aproximadamente el mismo, $E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$, lo que implica que pasar de una tensión inicial de 0 a una tensión igual a su resistencia máxima requiere una deformación grande en el acero de alto límite elástico. Por tanto, si se pretende emplear este tipo de acero para armar una viga, tal como se indica en la Figura 4.2, el hormigón se agrietará exageradamente y aparecerán grandes deformaciones antes de alcanzar tensiones próximas a su máxima capacidad. Trabajar a resistencias máximas con acero de alto límite elástico sólo es posible si éste es introducido en el hormigón con una predeformación (o tensión inicial, denominada pretensión). Con esta técnica es posible que, para deformaciones pequeñas o nulas, el acero trabaje a tensiones cercanas a su tensión máxima. En la Figura 4.3 se representan los diagramas de tensiones normales debidas al efecto del pretensado, suponiendo en la sección transversal situada en el centro de luz el acero (cable de pretensado) está sometido a una carga axial de valor N .

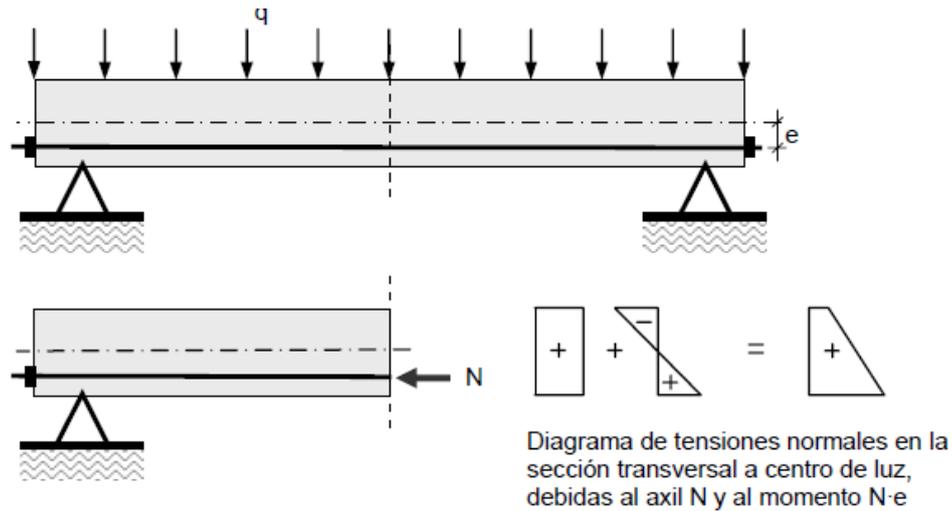


Figura 4.3 Viga de Hormigón con acero pretensado (Hernández-Montes, Gil-Martín 2007)

Si al estado de tensiones inicial, debido al pretensado -fuerza del axil N y momento $N \cdot e$, se le suman las tensiones correspondientes al momento flector generado por la carga q , tenemos:

Estado final

Figura 4.4 Estado de tensiones en la viga pretensada (Hernández-Montes, Gil-Martín 2007)

Se puede observar que el estado de tensiones final (o en carga), representado en la Figura 4.4, presenta tensiones menores que el estado de tensiones inicial (o descargado) de la Figura 4.3.

Este nuevo tipo de hormigón estructural se denomina hormigón pretensado. Es interesante señalar que cuando un hormigón armado se desencofra (el encofrado es el sustento necesario hasta que endurezca) las barras de acero quedan traccionadas mientras que, en la zona de compresiones, el hormigón queda comprimido. Así pues, tanto en el hormigón armado como en el pretensado, el acero quedará finalmente tensado.

A la armadura propia del hormigón armado se le denomina armadura pasiva y a la propia del hormigón pretensado se le denomina armadura activa.

Frente a la utilización del acero como armadura pasiva y activa en los hormigones pretensados en el que la corrosión del mismo está resultando llevar asociado un enorme coste de mantenimiento de las estructuras de hormigón. Investigadores y autoridades han buscado posibles mejoras para reducir o incluso eliminar la corrosión en el interior del hormigón.

Sería ideal encontrar un material con las mismas o mejores características resistentes que el acero pero sin las desventajas propias del material, como es su oxidación y todos los problemas derivados de ésta.

En este sentido, existen actualmente las barras de polímeros reforzados con fibras (FRP, Fiber Reinforced Polymer). Con este material se pueden diseñar estructuras que resistan las cargas solicitadas sin alterar la geometría y las dimensiones de la estructura.

4.2 Desarrollo histórico del pretensado con FRP.

En los años 1930 se introduce el concepto de usar fibras cortas de vidrio pero no fue desarrollado el concepto a fibras largas hasta dos décadas después.

En los años 1950 y 1960 del el cuerpo de ingenieros del ejército americano se interesó en las fibras largas de vidrio para refuerzo y generó una serie de informes (Mather y Tye 1955; Pepper y Mather 1959; Wine, Dietz y Hawley 1966). A pesar de estos informes y la investigación las aplicaciones fueron limitadas.

En los años 1970 el deterioro por corrosión de las armaduras en puentes reactivó el interés para conseguir diseños resistentes a la corrosión en ambientes corrosivos. Esta investigación se reactiva en Alemania con el estudio de tendones pretensados a base de GFRP.

1978. La unión de Strabag-Bau y Bayer da lugar a tendones de GFRP y un sistema de anclaje post-tesado. Sistema incorporado a puentes en Alemania y Austria. Strabag-Bau paró sus actividades en este campo hasta los años 90.

NBS (National Bureau of Standards) que ahora ha pasado a llamarse NIST (National Institute of Standards and Technology) examinó unas varillas no metálicas para cables de antena. El proceso les condujo a investigar en el primer anclaje de cables de composite que llegó a ser relevante en la aplicación de FRP para hormigón pretensado (NBS 1976).

En los años 1980 crece el interés en las barras no metálicas debido a la corrosión. En 1983. AKZO un productor químico de Holanda y HBG, un contratista, se unieron para desarrollar la fibra de aramida (AFRP) para tendones pretensados.

Durante estos años 1980 la investigación de los japoneses dio lugar al desarrollo dio lugar a técnicas para la para la aplicación de refuerzo de FRP en estructuras de hormigón. tenían un programa nacional para el estudio del refuerzo con FRP de estructuras de hormigón.

1988 En EE.UU. se desarrolla un nuevo anclaje para tendones de fibra de vidrio (Iyer 1988). Financiado por el departamento de transporte de Florida (FDOT) el cual fundó un grupo de estudio mayor para investigar las aplicaciones del pretensado de fibra de vidrio para puentes y estructuras marinas.

1989 Investigación del uso del Kevlar en el pretensado por parte de Dolan.

Esta investigación culminó en la primera conferencia para dirigir la investigación en los composites de FRP en aplicaciones para ingeniería civil (Iyer and Sen 1991) y en la construcción del primer puente con FRP pretensado en Rapid City, Dakota (Iyer 1993).

Este y otros esfuerzos de investigación y el desarrollo de algunos sistemas de tendones comerciales fueron discutidos en First International Symposium for FRP in Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-1) (Nanni y Dolan 1993), y en la Japanese Society of Civil Engineers publication (JSCE 1996).

A continuación se expone un Cuadro cronológico de investigación internacional en el campo de los FRP's extraído del fib Bulletin 40: FRP Reinforcement in RC Structures.

AÑO	GRUPO DE TRABAJO
1818	Se funda la institución de ingenieros civiles en UK.
1849	Se inventa el hormigón armado.
1887	Se funda CSCE, Canadian society for Civil Engineering.
1904	Se funda ACI, American Concrete Institute.
1953	Se funda CEB, Comité Euro-Internationale du Beton.
1970s	JSCE, Japan Society of Civil Engineers, Se establece un comité de estudio de materiales FRP.
	Uso de las fibras como refuerzo en el hormigón armado.
1987	La JSCE, Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles establece un comité sobre materiales continuos de fibra como refuerzo.
	CSCE, se establece el comité técnico sobre los FRP's.
1991	CSCE, Publica un informe sobre FRP's

AÑO	GRUPO DE TRABAJO
	ACI, se funda el Comité 440, sobre FRP como refuerzo interno y externo del hormigón
	CEB, Se inicia el Proyecto BRITE-EURAM
1992	JSCE, Publica el Estado del Arte sobre el refuerzo con materiales de fibras continuas.
1993	CEB, Se inicia el Proyecto EUROCONCRETE
1996	CEB, Se funda el grupo de trabajo (Task Group), con el objetivo de elaborar una guía de diseño siguiendo el formato de CEB-FIP Model Code.
	CEB, EUROCONCRETE publica recomendaciones de diseño para FRP RC.
	JSCE, Publica recomendaciones de diseño para FRP RC.
1997	CEB, se funda TMR Network ConFibreCrete
1998	El CSCE publica recomendaciones de diseño para FRP RC en puentes.
	De la fusión de CEB y FIP en fib, el grupo de trabajo sigue con la designacion fib TG 9.3 “FRP Reinforcement for Concrete Structures, Commission”
1999	IStructE, Institution of Structural Engineers. UK, Publica recomendaciones de diseño para FRP RC.
	The Swedish National,, publica un código para FRP RC.
2000	The Concrete Society, UK, publica un informe técnico, TR55, sobre adherencia externa en refuerzos FRP.
	Fib publica en el Bulletin nº 10 sobre adherencia del refuerzo(un capítulo trata sobre la adherencia en barras FRP).
2001	fib, publica el Bulletin nº 14, sobre la adherencia de refuerzos externos en FRP.
	ISIS Canada Research Network (Intelligent Sensing for Innovative Structures) , publica una serie de manuales sobre el uso interno, externo y pretensado de los refuerzos FRP.

AÑO	GRUPO DE TRABAJO
	ACI, Committe 440, publica la primera versión de sus recomendaciones de diseño para refuerzos internos con FRP, 440.1R
2002	ACI, Committe 440, publica la primera versión de sus recomendaciones de diseño para refuerzos externos con FRP, 440.2R.
	CUR Building & Infrastructure. (Holanda)., Publica recomendaciones para el uso de los FRP's en hormigón armado.
2003	ACI, el comité 440 publica la segunda versión de sus recomendaciones para el uso interno como refuerzo de los FRP's. "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars". 440,1R
2004	ACI, 440,3R. Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures.
	ACI, 440,4R.Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons.
	CNR. National Research Council. Italia. Recomendaciones para el refuerzo externo con FRP. CNR-DT 200/2004
2006	CNR. National Research Council. Italia. Recomendaciones para el refuerzo interno con FRP. CNR-DT 203/2006
	ACI, 440,1R Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars. (Tercera versión).
2007	CEB-FIP publica el fib Bulletin nº 40: FRP Reinforcement in RC structures. Task Group 9.3.
	ACI 440 R-07. Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures
2011	Reaprovado ACI, 440,4R.Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons.

Tabla 4.1 Cuadro Cronológico de la investigación de FRP (Fib bulletin 40 2007, Iborra 2009)

4.3 Esfuerzos investigadores.

4.3.1 Estandarización y recomendaciones de diseño

La FHWA (Federal Highway Administration) patrocinó investigaciones para la **estandarización de ensayos** de materiales de FRP y también para el desarrollo de **recomendaciones de diseño** para puentes con vigas

pretensadas con FRP lo que llevo a las especificaciones de diseño para AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (Dolan et al. 2000)

En Canadá se han llevado a cabo investigaciones la mayoría de las cuales dentro del ISI Canadá (Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures).

La crisis de en la economía japonesa en los años 1990 redujo la marcha del programa de desarrollo japonés y ha acortado la disponibilidad de muchos productos japoneses para la evaluación y ensayo en Norteamérica. El desarrollo en Japón han sido dirigidos por Fukuyama (1999), y los detalles de algunos proyectos recientes están disponibles Club de Cables Compuestos Avanzados.

El EUROCRETE es un proyecto de colaboración europea con socios de Reino Unido, Holanda, Suiza, Francia y Noruega comenzó en diciembre de 1993 y acabó en 1997. Este proyecto incluyó desarrollo del material, investigación de durabilidad en entornos agresivos, determinación del comportamiento estructural, y el desarrollo de guías de diseño, tecno-económicas y estudios de viabilidad. El proyecto incluyó la construcción de estructuras demostrativas.

Las actividades en Europa en lo relativo al uso de FRP fueron resumidas por Taerwe and Matthys (1999).

Los proyectos financiados por la UE como el proyecto BRITE/EURAM, "Fiber Composite Elements and Techniques as Non-Metallic Reinforcement for Concrete," comenzó en noviembre de 1991 y finalizó en 1996.

Las universidades de Braunschweig y Gante junto con socios industriales de Alemania y Holanda investigaron las características y aspectos estructurales del refuerzo de FRP para hormigón pretensado y el armado de elementos de hormigón.

4.3.2 Informes y estados del arte.

Estado del arte sobre FRP pretensado en Estados Unidos ha sido documentado por Dolan (1999).

4.3.3 Anclajes

El primer desarrollo tiene lugar en los 80 en la Escuela de Minas de Dakota del Sur (EE.UU.) por Iyer que desarrollo el primer **anclaje** para pretensado de FRP a finales de los 80. El primer puente construido con fibra de vidrio en EE.UU. fue n Rapid City en Dakota del Sur en 1990.

Anclajes en forma de cuña no corrosiva para tendones de FRP han sido desarrollados en University of Calgary (Sayed-Ahmed and Shrive 1998; Campbell et al. 2000; Shaheen 2004).

4.3.4 Durabilidad

Universidad del sur de Florida, Florida Atlantic University y el departamento de transporte de Florida (Sen, Issa y Mariscal 1992) han realizado estudios de estas incluyen: **ensayos estáticos y de fatiga** de vigas, puentes de medio tamaño, estudios de **durabilidad**, y ensayos con pilotes a tamaño real. Se evaluaron los tres tipos de fibra (aramida, vidrio y carbono)

Investigadores de la Universidad de Queen's han investigado el **comportamiento a baja temperatura** y a **largo plazo** de tendones pretensados de CFRP (Bryan and Green 1996). Cables de CFRP para pretensar losas del tablero de los puentes (Braithwaite, Green, and Soudki 1996).

En la University of Sherbrooke, extensas investigaciones sobre la **durabilidad** de los cables de FRP para armar o pretensar hormigón y en el desarrollo de un anclaje tipo adherente (Zhang 2002).

4.3.5 Tendones externos y no adheridos

Lawrence Technological University ha desarrollado una demostración para un puente usando **tendones externos de FRP sin adherir** (Grace 1999).

Aplicaciones de **tendones no adheridos** University of Windsor (Salib, Abdel-Sayed, and Grace 1999).

Tendones **parcialmente pretensado y parcialmente adheridos** (Rizkalla, Fang, and Campbell 2001).

4.3.6 Comportamiento estructural

Universidad de Manitoba énfasis en tendones de CFRP y consideraron el comportamiento de las vigas pretensadas en **estado límite de servicio y estado límite último** (Abdelrahman, Tadros, and Rizkalla 1995; Fam, Rizkalla, and Tadros 1997).

Extensos estudio sobre **longitud de desarrollo y longitud de transferencia**.

4.3.7 Adherencia

Trabajo sobre la **longitud de transferencia** en vigas pretensadas con CFRP (Soudki, Green, and Clapp 1997).

Los **efectos de la temperatura** en vigas pretensadas con FRP han sido el centro de la investigación de Concordia University.

4.3.8 Aplicaciones

Los investigadores de Carleton University y University of Waterloo también han investigado aplicaciones para tendones pretensados de FRP.

En el Royal Military College of Canada se ha desarrollado el trabajo sobre tendones de aramida (McKay y Erki 1993) y más recientemente en tendones de CFRP.

4.3.9 Esfuerzos individuales

Mucha de la investigación ha sido llevada a cabo por investigadores individuales de las universidades University of Arizona (Eshani, Saadatmanesh and Nelson 1997), the University of Michigan (Naaman and Jeong 1995), the Massachusetts Institute of Technology (Triantafillou and Deskovic 1991), Pennsylvania State University (Nanni et al. 1996a,b), South Dakota School of Mines (Iyer et al. 1996), the University of California (Long Beach), West Virginia University (Vijay and GangaRao 2001), the University of Wyoming (Dolan et al. 2000), and Lawrence Technological University (Grace2000a,b). (ACI 440.4R-04 2004)

4.4 Guías de diseño y comités técnicos.

4.4.1 Europa.

En 1993 se inicia el Proyecto EUROCONCRETE que posteriormente, en 1996, da inicio al Grupo de Trabajo de investigación FIB TG. 9.3, Reinforcement for concrete structures in Comisión 9 Reinforcing and Prestressing Materials and Systems.

El TG 9.3 ha desarrollado los siguientes documentos en referencia al refuerzo de estructuras de hormigón armado con materiales compuestos a base de fibras y resinas poliméricas, FRP:

- FIB Bulletin nº 10, Bond of non-metallic reinforcement. 2000.
- FIB Bulletin nº 14, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. 2001.
- FIB Bulletin nº 40, FRP reinforcement in RC structures. 2007.

Las actividades más recientes en Europa han sido resumidas por Matthys y Taerwe (2001)

4.4.2 Estados Unidos.

Transportation Research Board (TRB) Estableció el comité A2C07 para analizar el uso de FRP en puentes.

En 1991 se funda el Comité de Trabajo ACI 440, Fiber Reinforced Polymers for Internal and External Reinforcement of Concrete.

De este grupo de trabajo surgen las siguientes publicaciones:

- ACI 440R-07. Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. (solo la introducción). 2007.
- ACI 440.4R-04. Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons. 2004. Reaprovada en 2011

- ACI 440R-96. State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. 1996.

Otras sociedades han tenido en este tema como son: Society for Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE) y Market Development Alliance (MDA) de la industria de composites de FRP.

En EE.UU tenemos la ASCE (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles) estableció el “standard committee” dirigido a productos de FRP.

4.4.3 Canadá.

Canadian Society for Civil Engineering, CSCE, estableciéndose el Comité Técnico sobre el uso de los materiales compuestos, FRP en 1987. De este grupo de trabajo surgen las siguientes publicaciones:

- Publicación de un informe sobre los FRP's. 1991.

ISIS Canada Research Network (Intelligent Sensing for Innovative Structures).

- Manuals on the use of internal, external and prestressed FRP reinforcement. 2001.

The Canadian standard association (CSA).

- CAN/CSA S6-00 Puentes
- CAN/CSA S806-06 edificios.

4.4.4 Japón.

En 1987 JSCE, Japan Society of Civil Engineering, establece un Comité Investigador sobre los materiales continuos reforzados con fibras.

De este grupo de trabajo surgen las siguientes publicaciones:

- State of the art report on continuous Fiber reinforcing materials. 1992.
- 1993 primera guía en Japón (JSCE) Versión japonesa en 1995 y en inglés en 1997.

4.5 Tendones y anclajes.

Los tendones de FRP son producidos en una amplia gama de fibras, resinas, formas y tamaños como ya se ha detallado en el apartado 3.1 y 3.2. El ACI 440.4R-04 solamente recomienda para la utilización en hormigones pretensados las fibras de aramida y carbón. La no recomendación de las fibras de vidrio se debe a que estas tienen poca resistencia a la fluencia lenta bajo cargas sostenidas y que son más susceptibles a la degradación alcalina que las fibras de aramida y carbono.

Los japoneses han desarrollado un sistema para definir los tendones como podemos observar en la Tabla 4.2:

Tipo de fibra	Identificación
Fibra de Aramida	A
Fibra de Carbon	C
Fibra de Vidrio	G
Multiples fibras	*
*Si se usan múltiples fibras la primera letra indica cual es la fibra dominante (por ejemplo, CA para carbono/aramida indica que hay un mayor volumen de fibra de carbono)	

Tabla 4.2 Identificación de la fibra (ACI 440.4R-04 2004)

El tendón y el anclaje forman un sistema. Las propiedades del tendón están desarrolladas para un anclaje específico. Si usamos un anclaje alternativo podemos no tener la misma resistencia y propiedades del sistema.

4.5.1 Tendones comerciales.

El resumen de las propiedades de los tendones disponibles en el mercado está en la Tabla 4.3 y se basa en los datos publicados por los fabricantes. Se utilizan los nombres comerciales por claridad y perspectiva histórica. No todos los tendones están en la actualidad disponibles y las propiedades de los mismos pueden cambiar.

Property	AFRP				CFRP	
	Arapree®	FiBRA	Technora®	Parafil®	Leadline™	CFCC
Fiber	Twaron	Kevlar49	Technora	Kevlar49	Carbon	Carbon
Resin	Epoxy	Epoxy	Vinyl ester	—	Epoxy	Epoxy
Fiber volume ratio	0.45	0.65	0.65	—	0.65	0.65
Density, g/cm ³	1.25	1.28	1.3	1.44	1.53	1.5
Longitudinal tensile strength, GPa	1.2 to 1.5	1.25 to 1.4	1.7 to 2.1	1.2 to 1.9	2.25 to 2.55	1.8 to 2.1
Transverse tensile strength, MPa	—	30	—	—	57	—
Longitudinal modulus, GPa	62 to 64	65 to 70	54	120 to 130	142 to 150	137
Transverse modulus, GPa	—	5.5	—	—	10.3	—
In-plane shear strength, MPa	—	4.9	—	—	71	—
In-plane shear modulus, GPa	—	2.2	—	—	7.2	—
Major Poisson's ratio	0.38	0.34 to 0.6*	0.35	—	0.27	—
Minor Poisson's ratio	—	0.02	—	—	0.02	—
Bond strength, MPa	7.7	10 to 13	10 to 16	—	4 to 20	7 to 11
Maximum longitudinal strain, %	2.4	2.0 to 3.7	3.7 to 3.8	1.5 to 1.7	1.3 to 1.5	1.57
Maximum transverse strain, %	—	—	—	—	0.6	—
Longitudinal compressive strength, MPa	—	335	—	—	1440	—
Transverse compressive strength, MPa	—	158	—	—	228	—
Longitudinal thermal expansion coefficient/°C	-2 × 10 ⁻⁶	-2 × 10 ⁻⁶	-3 × 10 ⁻⁶	—	-0.9 × 10 ⁻⁶	0.5 × 10 ⁻⁶
Transverse thermal expansion coefficient/°C	50 × 10 ⁻⁶	60 × 10 ⁻⁶	—	—	27 × 10 ⁻⁶	21 × 10 ⁻⁶
Relaxation ratio at room temperature, % loss from jacking stress	11 to 14	12 at 103 h	8 to 13 at 103 h	6 to 9 at 105 h	2 to 3	0.5 to 1 at 102 h

*Pseudo Poisson's ratio due to structure of tendon.

Notes: A "—" indicates that information is not available or is not applicable. 1 MPa = 145 psi; 1 GPa = 145 ksi; 1 g/cm³ = 62.4 lb/ft³; and 1/°C = 1.8/°F.

Tabla 4.3 Propiedades de tendones de FRP (ACI 440.4R-04 2004)

4.5.2 Descripción de los tendones.

Arapree® es un desarrollo combinado de AKZO Chemicals y Hollandsche Beton Groep en Holanda. Consiste en fibras de aramida embebidas en una matriz de resina epoxy. Disponible en dos tipos de sección: rectangular y circular. La forma es fácil para adherir con un anclaje tipo cuña (Gerritse and Werner 1988)

El anclaje consiste en una manga metálica la cual es rellena con lechada o el tendón es fijado con una abrazadera entre dos cuñas.

FiBRA producida por Mitsui Construction Company de Japón. Consiste en una trenza de cables de fibra seguido de una impregnación en resina epoxy y posterior curado. Las fibras usadas pueden ser de carbono o de aramida siendo esta última la más común.

Dos tipos de anclaje:

- Relleno de resina usado para un único tendón
- Anclaje de cuña usado para tendones múltiples. Formado por cuatro cuñas de acero que se introducen en una manga cónica. El interior del manguito y el exterior de las cuñas está lubricado para poder quitar el anclaje.

Technora® Tendón de aramida desarrollado conjuntamente por Sumitomo Construction Company y Teijin Corporation, ambas japonesas. Se trata de un tendón pultrusionado en espiral cubierto por una resina de vinil ester.

Utiliza anclajes tipo cuña y rellenos de resina. Los anclajes sirven para un tendón simple o para tendones múltiples (de 3 a 9).

Parafil® Linear Composites Limited of England es el fabricante. Utiliza fibras de Kevlar. No es estrictamente un FRP ya que no tiene resina que una todas las fibras que se sitúan en paralelo sino un recubrimiento exterior para mantener la forma del cable y proteger la aramida de los rayos UV a los que es susceptible. Uso en tendones externos o en tendones internos no adheridos dentro de conductos. Tiene problemas con la alcalinidad del hormigón. Las tensiones están limitadas normalmente a 1000 MPa.

- No puede ser adherido al hormigón
- No contiene resina.
- No fue desarrollado originalmente para pretensado.

Anclaje mediante un barril y una estaca (spike) que aprisiona las fibras.

University of Cambridge: desarrollo de cables de aramida colocados en capas paralelas.

Leadline™ Mitsubishi Kasei Corporation de Japón. Cables de carbono fabricado por pultrusión en una matriz de resina epoxy. Tiene diferentes tipos de acabado lisos y en cordón helicoidal.

Utiliza un anclaje de cuñas con camisa de aluminio.

CFCC Carbon fiber composite cable. Desarrollado por Tokyo Rope Mfg. Co., Ltd. and Toho Rayon Co, ambos japoneses. Es un CFRP recubierto por resina epoxy. Se trata de un enrollado de tendones como en un cable de acero. El recubrimiento de resina epoxy protege al tendón de los rayos UV y del daño mecánico mientras aumenta la adherencia con el hormigón.

Los anclajes son de relleno con resina epoxy y die-cast métodos.(no acabo de entender el método)

Muchos de los sistemas comerciales tendón/anclaje han sido ensayados por Nanni y al (1996a,b)

4.5.3 Caracterización de los anclajes.

A continuación pasamos a describir brevemente los distintos tipos de anclaje para los tendones que existe.

4.5.3.1 Abrazadera

La fuerza es transferida al anclaje por fricción y cortante y está influida por la rugosidad de las partes y la fuerza aplicada en los pernos. La actuación del anclaje mejora con la utilización de un material que recubre el tendón. El material intermedio debe tener baja rigidez y una gran deformación última para suavizar la presión lateral en el tendón. (Malvar y Bish 1995). La longitud del anclaje es variable dependiendo del material elegido para asegurar que se alcanza la resistencia última del tendón.

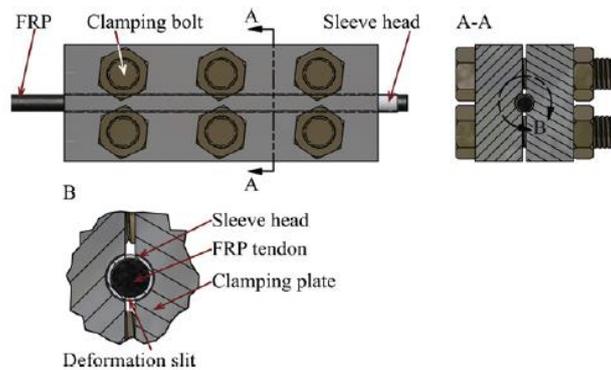


Figura 4.5 Anclaje en abrazadera (Schmidt et al. 2010)

4.5.3.2 Plug and cone (barrel and spike).

Sistema formado por un run receptor y una punta cónica. Sistema particularmente apto para los tendones de aramida Parafil® ya que estos no están recubiertos por resina. El mecanismo de adherencia es similar al del sistema de cuñas donde el tendón es sujetado por las fuerzas de compresión al insertar la punta cónica en el recipiente. La tensión de compresión unida al rozamiento entre el tendón y la camisa sumada a la de la punta cónica generan una tensión de fricción que resiste el deslizamiento del tendón.

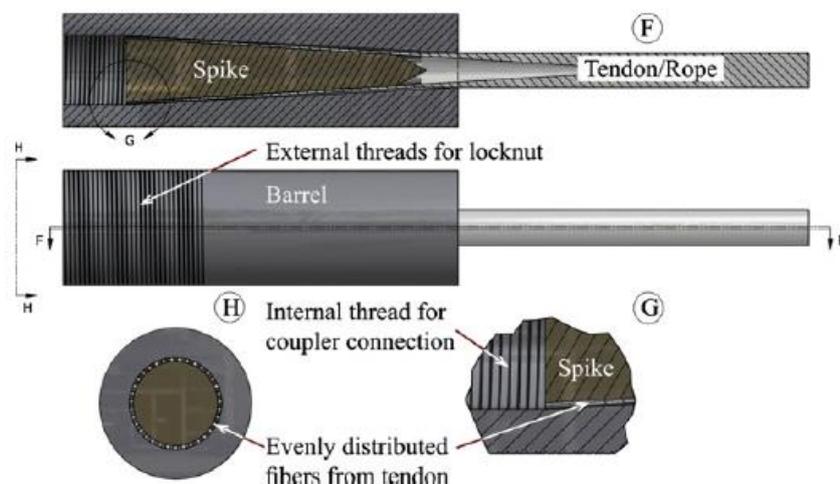


Figura 4.6 Anclaje Barrel and spike (Schmidt et al. 2010)

4.5.3.3 Camisa recta.

El tendón está embebido en resina que rellena el tubo metálico de cobre o acero de forma cilíndrica (recta). Los materiales de relleno van desde cemento que sin retracción, con o sin arena a cemento expansivo con resinas epoxy.

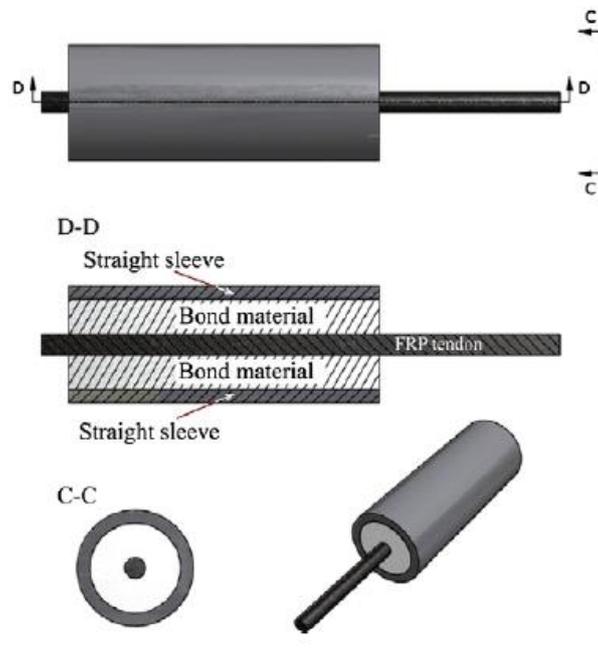


Figura 4.7 Anclaje de camisa recta (Schmidt et al. 2010)

En el caso de cemento sin retracción la adherencia depende, cemento y polímeros la transferencia de la carga depende completamente de la adherencia y el interlocking entre los componentes del anclaje.

El mecanismo de transferencia de la carga es por adherencia de la interfase entre el cable y el material de relleno y entre el material de relleno y el tubo metálico.

Para incrementar la adherencia: tratamiento interno del tubo metálico, o adición de arena a la resina, o ambas al mismo tiempo.

Aditivos en la resina también sirven para reducir la retracción química de la misma.

Para mejorar la adherencia entre el tendón y la lechada se utilizan tratamientos superficiales del tendón.

Harada 1993 primeros en usar cemento expansivo. La presión lateral mejora la resistencia al deslizamiento. Presión radial de 25 a 40 MPa.

Las presiones interiores radiales desarrolladas por los materiales expansivos cementicios son adecuadas para agarrar tendones FRP con una amplia gama de configuraciones superficiales sin causar concentraciones de tensión excesivas en el punto de salida del tendón durante cargas cuasi estáticas y cíclicas.

La longitud de los anclajes es de 300 a 400 mm.

La efectividad del anclaje se ha demostrado para altas temperaturas y el ensayo extendido de relajación (Dye, Bakis y Nanni 1998)

El principal defecto de este sistema de anclaje es que el curado del material de relleno puede de ser de 2 o 3 días.

4.5.3.4 *Camisa con forma cónica.*

Mismos componente que el de camisa recta. La principal diferencia es que el tubo es de forma cónica.

El mecanismo de transferencia de carga del tendón al tubo es la tensión de cortante en la interfase la cual es función de la adherencia y la tensión radial producida por la variación del perfil del material de relleno.

El perfil cónico con un ángulo constante es el tipo de anclaje más popular con material de relleno.

Kim and Meier (1991) desarrollaron un anclaje de rigidez variable para tendones de CFRP. El anclaje estaba hecho de un cono relleno de una matriz epoxy que contenía filler cerámico de alto módulo. Holte, Dolan, y Schmidt (1993) describieron un anclaje parabólico con epoxy y filler de arena.

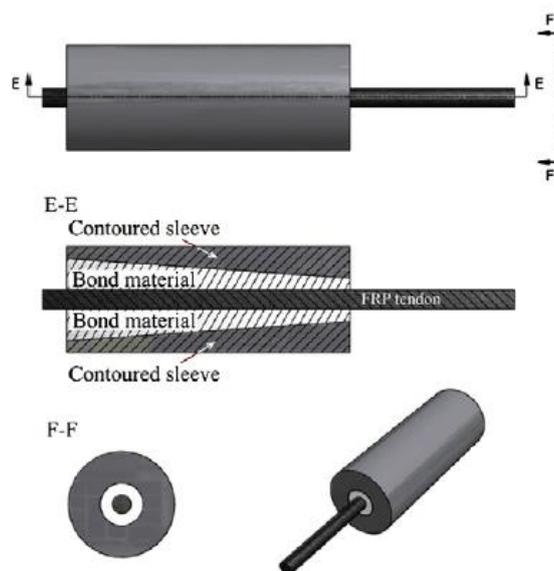


Figura 4.8 Anclaje camisa con forma cónica (Schmidt et al. 2010)

Los parámetros afectan a la actuación del anclaje con resina de relleno son los siguientes.

- Longitud del anclaje
- Ángulo del cono
- Módulo de elasticidad del material de relleno
- Longitud y módulo característico de la “soft zone” en la resina de relleno en el frente del anclaje

Finalmente las principales desventajas de este tipo de anclaje son el tiempo de curado y el precortado de la longitud de anclaje.

4.5.3.5 Cuñas partidas

Los sistemas de cuñas partidas son los preferidos debido a:

- Su compacidad
- Fácil montaje
- Reutilizable
- Fiabilidad.

Hay dos categorías: sistemas con contacto directo entre las cuñas (plástico o acero) y el tendón y sistemas que usan un recubrimiento intermedio.

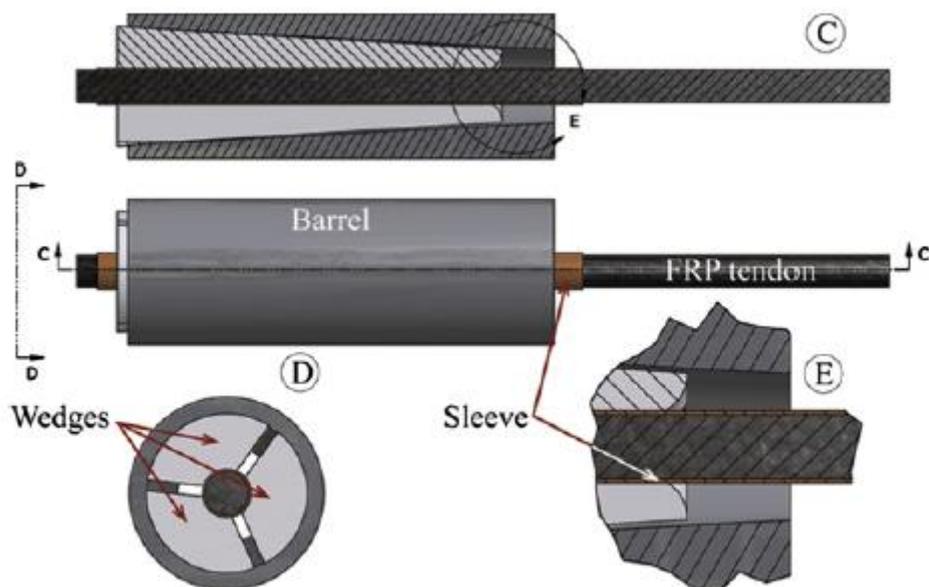


Figura 4.9 Anclaje tipo sistema cuña partida (Schmidt et al. 2010)

Los anclajes de cuña que son usados en el anclaje de tendones de acero, deben ser modificados para el empleo con tendones FRP, aumentando su longitud para reducir la tensión transversal sobre el tendón y controlando la rugosidad en la cuña para prevenir hacer una muesca el tendón. El número de las cuñas en el anclaje varía de dos a seis cuñas insertadas en el barril. La razón principal de aumentar el número de cuñas es proporcionar una distribución de tensión más lisa lateral en la dirección radial del tendón. El mecanismo de agarre confía en la fricción y sujetando con abrazaderas la fuerza entre las cuñas, el barril, y el tendón. La utilización de pequeño afilado de las cuñas es muy importante para proveer un uniforme distribución de la tensión transversal.

El programa canadiense ISIS desarrollo un anclaje metálico para tendones Leadline™ de CFRP

Se han realizado versiones no metálicos de este anclaje con hormigón de ultra altas prestaciones (UHPC, ultra high-performance concrete) donde el barril está enrollado con una hoja de CFRP o de “*carbon fiber reinforced reactive powder concrete*” desarrollados y ensayados por Reda Taha and Shrive (2003a,b) y Shaheen(2004), respectivamente.

4.5.4 Modos de fallo de los anclajes.

Varios modos de fallo se han observado en los anclajes de cuñas y que podemos resumir en dos categorías: los fallos del sistema de anclaje y el fallo del tendón fuera del anclaje.

Los fallos del sistema de anclaje los podemos resumir en:

- Deslizamiento del tendón por falta de adherencia
- Deslizamiento del tendón y la camisa juntos respecto a las cuñas
- Deslizamiento de las cuñas respecto al tambor
- Rotura del tendón dentro del anclaje.

Fallo del tendón fuera del anclaje

- Si la rotura del tendón se produce a menos de 3 diámetros del anclaje se considera que este contribuye a la rotura.

4.6 Comportamiento a flexión

4.6.1 Consideraciones generales.

La falta de protocolos de ensayo regulados y de procedimientos para los informes hace la comprensión de este criterio muy complicada.

En el pretensado convencional con tendones de acero la viga se deforma elásticamente hasta la fisuración entonces se incrementa la flecha conforme se deforma el tendón hasta que ocurre el fallo por rotura (crushing) del hormigón o rotura del tendón.

Las vigas pretensadas con FRP deforman elásticamente hasta la fisuración, entonces continua la deformación de forma lineal bajo el incremento de la carga hasta la ruptura del tendón o hasta que se produce la última tensión de deformación del hormigón. Figura 4.10

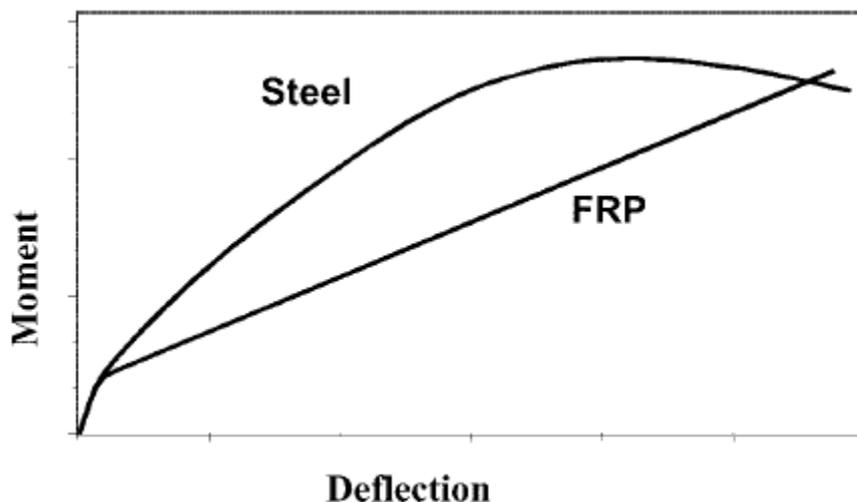


Figura 4.10 Diagrama esquemático momento-deformación (ACI 440.4R-04 2004)

El bajo módulo de elasticidad del FRP se refleja en el bajo comportamiento post-rotura. El nivel de tensión de servicio puede ser calculado usando técnicas similares al hormigón pretensado convencional.

La pérdida de pretensado con tendones de FRP es debida a los siguientes factores:

- Asentamiento del anclaje en función del sistema del tendón
- Fluencia del hormigón.
- Fisuración del hormigón.
- Acortamiento elástico.
- Relajación de los tendones

Las pérdidas debidas a la fluencia, fisuración y acortamiento elástico pueden ser calculadas con métodos estándar de hormigón pretensado. Las pérdidas de pretensado de los tendones de FRP debido a estas tres causas son normalmente menores que las correspondientes pérdidas para tendones de acero debido al bajo módulo de elasticidad de los tendones de FRP.

Las pérdidas por relajación de los tendones son más problemáticas y menos entendidas. La relajación varía con el tipo de fibra y son proyectadas para que sean menores que el 12% del nivel de pretensado inicial sobre la vida de la estructura.

Tenemos dos tipos de fallos: ruptura del tendón de pretensado y rotura del hormigón por compresión. Estos tipos de fallo dependen de si realmente la sección transversal tiene suficiente capacidad de giro para desarrollar la tensión última de tracción del refuerzo de FRP.

Cuando el hormigón tiene suficiente capacidad de rotación (es decir suficiente área de hormigón en compresión) se produce la rotura del tendón que viene acompañada de fisuras horizontales al nivel de pretensado causando el spalling del recubrimiento de hormigón. Según algunos investigadores la ruptura del FRP pretensado viene acompañada de una liberación de energía de tensión elástica que es absorbida en parte por el hormigón. Lo cual provoca un extenso fisurado y spalling del recubrimiento.

Cuando el fallo se produce por el aplastamiento del hormigón (crushing) (la sección transversal no tiene suficiente capacidad de rotación) el fisurado es menos extensivo comparado con el fallo de la viga cuando fallan los tendones.

Algunos investigadores han constatado que cuando la viga pretensada con FRP falla por aplastamiento del hormigón se incrementa la ductilidad. Este comportamiento se atribuye al progresivo fallo del hormigón en compresión (Grace y Sayed 1998a).

El comportamiento antes de la fisuración es bastante similar en las vigas con CFRP y las de acero. Abdelrahman y Rizkalla 1997, encontraron que las vigas con refuerzo de FRP tenían mucha menos rigidez después de la fisuración resultando mayores deformaciones post fisuración. La flecha última en las vigas pretensadas con acero fue, sin embargo, mucho mayor debido a la fluencia del acero. La carga última de las vigas reforzadas con CFRP fue más alta si las comparamos con las de acero.

Para vigas con acero pretensado es preferible los tendones adheridos debido a la corrosión de los tendones no adheridos. Debido a que los tendones de FRP son resistentes a la corrosión el adherido (recubrimiento de hormigón) puede no ser requerido. Los tendones no adheridos facilitan su reemplazo en caso de no ser

adecuados o de que aumenten las cargas con las que se ha diseñado. Los elementos con FRP no adherido son más deformables que los correspondientes adheridos

Los problemas de los tendones no adheridos: el anclaje del FRP, la resistencia a fatiga de estas vigas especialmente en la unión de la viga y el anclaje.

Las vigas post-tesadas con tendones de FRP no adheridos muestran menos fisuración en condiciones de carga a corto plazo comparado con las mismas vigas con tendones adheridos (Maissen y De Smet 1995) pero las fisuras están normalmente concentradas en unas pocas fisuras.

La respuesta de carga-deformación en los no adheridos post-tesados es bilineal pero comparado con el pretensado y adherido la rigidez post fisuración es mucho menor.

Taerwe y al. (1992) ensayaron tres vigas de poca luz y una viga a tamaño real, pretensadas con GFRP. Los autores informaron de un comportamiento satisfactorio y que la rotura de la viga fue por ruptura de los tendones de pretensado. Los tendones mostraron un comportamiento frágil. Los resultados indican que la rotura de los elementos pretensados con GFRP viene acompañados de una extensiva fisuración y deformación similar a las vigas pretensadas con acero.

La anchura de las fisuras es más grande en vigas de características comparables pretensadas con acero a causa del bajo módulo del FRP. La carga de fatiga incrementa levemente la anchura de las fisuras. Dolan et al (2000)

Bryan y Green (1996) estudiaron el comportamiento a baja temperatura de vigas pretensadas con CFRP. No se observaron diferencias de comportamiento a corto plazo expuestas a bajas temperaturas.

Braimah y al (1998) y Mashe y Green (1999) estudiaron la viabilidad de pretensado transversal del hormigón en las losas del tablero de puentes con tendones de CFRP. Las losas funcionaron bien, incluso mejor que las pretensadas con acero en términos de servicio y resistencia.

4.6.2 Metodología del diseño a resistencia.

Una aproximación al diseño de la resistencia de vigas pretensadas con FRP está basada en el concepto de "balanced ratio", cantidad y distribución de armadura tal que en el diseño por tensiones admisibles se alcanzan simultáneamente la tensión de tracción admisible del acero y la tensión de compresión admisible del hormigón; o tal que en el diseño por resistencia la armadura de tracción llega a su resistencia a la fluencia especificada en el mismo momento que el hormigón comprimido llega a su deformación última supuesta de 0,003.

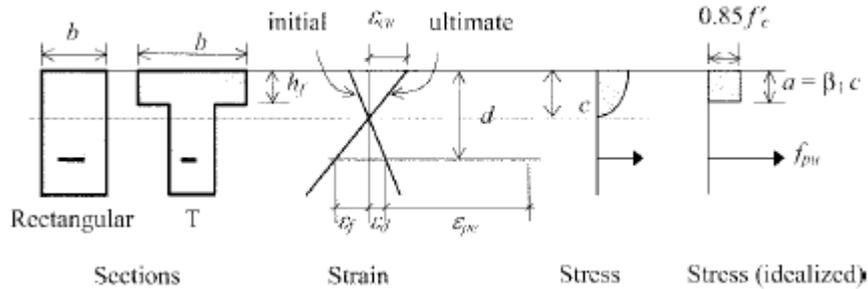


Figura 4.11 Balanced ratio. Condiciones de tensión y deformación (ACI 440.4R-04 2004)

4.6.3 Diseño a flexión y capacidad de predicción.

3.4.1 el comportamiento a flexión de la vigas puede describirse de acuerdo a si la sección crítica es “compression-controlled” (cuando el hormigón rompe por compresión antes de que lo hagan los tendones) o “tension-controlled” (rotura del tendón antes de que falle por compresión el hormigón)

4.6.4 Coeficiente de minoración de resistencia para flexión

Coeficiente de minoración de resistencia para flexión. Los factores que se han analizado son el tipo de tendón y el modo de fallo. La correlación más fuerte se produjo para el tipo de tendón. La Tabla 4.4 muestra estos coeficientes.

Tipo de tendón	Coef de reducción	Condición
Aramida	0,70	“Tension-controlled”
Carbono	0,85	
Aramida/carbono	0,65	“Compression-controlled”

Tabla 4.4 Coeficiente de minoración de la resistencia (Dolan and Burke 1996)

4.6.5 Tensión de servicio en flexión

En la ACI 440.4R-04 las tensiones para cargas de servicio son las mismas que las especificadas por la AASHTO (Standard Specification for Highway Bridges) y vienen dadas en la tabla XX. Son las mismas que especifica la ACI 318-023

<i>Allowable stress at transfer of prestress (before losses)</i>	Units, MPa (psi)
(a) Extreme fiber stress in compression	$0.6f'_{ci}$ ($0.6f'_{ci}$)
(b) Extreme fiber stress in tension except for (c)	$0.25\sqrt{f'_{ci}}$ ($3\sqrt{f'_{ci}}$)
(c) Extreme fiber stress in tendon at ends	$0.5\sqrt{f'_{ci}}$ ($6\sqrt{f'_{ci}}$)
<i>Allowable stresses under service loads (after losses)</i>	Units, MPa (psi)
(a) Extreme fiber stress in compression due to prestress plus sustained loads	$0.45f'_c$ ($0.45f'_c$)
(b) Extreme fiber stress in compression due to prestress plus total loads	$0.6f'_c$ ($0.6f'_c$)
(c) Extreme fiber stress in precompressed tensile zone	$0.5\sqrt{f'_c}$ ($6\sqrt{f'_c}$)

Tabla 4.5 Tensiones admisibles en el hormigón (ACI 440.4R-04 2004)

4.6.6 Tensión de tesado

En los tendones de acero la tensión típica es del 85% de tensión de fluencia o 0,005 de deformación.

La tensión permitida en los tendones de FRP está normalmente limitada del 40 al 65% de la resistencia última debido a la limitación tensión-ruptura (dolan 2000). Estas tensiones permitidas corresponden deformaciones entre 0,008 y 0,012 o 1,5 a 2,5 veces la deformación de pretensado usada en tendones de acero.

En la Tabla 3.3 limitaciones de deformación no deben superar el 65% del máxima deformación que puede desarrollar cuando ensayamos el tendón usando el anclaje especificado por el fabricante.

Tensión de pretensado admisible	
Carbono	$0,65 f_{pu}$
Aramida	$0,50 f_{pu}$
Tensión admisible después de la transferencia	
Carbono	$0,60 f_{pu}$
Aramida	$0,40 f_{pu}$

Tabla 4.6 Tensiones admisibles en el tesado (ACI 440.4R-04 2004)

4.6.7 Rotura por fluencia lenta de los tendones.

La fluencia es una deformación inelástica que se produce debido a cargas constantes mantenidas en el tiempo. Hay tres etapas de la fluencia

Primaria. Aumento de la deformación rápido después de la aplicación de la carga. Segunda etapa es un periodo de tiempo se mantiene constante la deformación. Se van rompiendo algunas fibras pero la fricción o la adherencia de la resina con las fibras transfieren la carga a las fibras adyacentes. Si el nivel de tensión es lo suficientemente bajo el daño se confina en este segundo estadio y la vida útil del tendón es ilimitada. La tercera etapa presenta un rápido incremento del fallo de las fibras hasta la rotura del tendón.

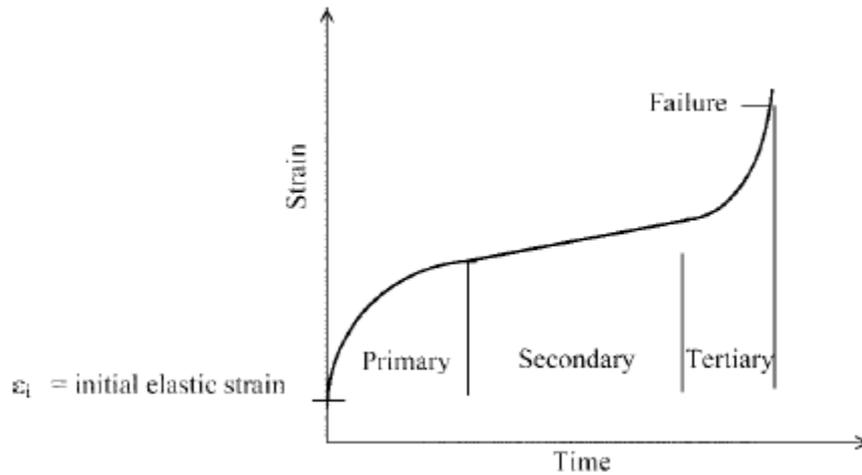


Figura 4.12 Etapas de la fluencia. (ACI 440.4R-04 2004)

Los tendones de AFRP siguen estas tres etapas.

El ratio de deformación en los tendones de CFRP en la segunda etapa cae a cero. Estos tendones muestran un fallo instantáneo comparado con el de la segunda etapa cuando la tensión inicial supera la tensión umbral de rotura por fluencia como podemos observar en la figura Figura 4.13 Curva de ruptra-fluencia del carbono

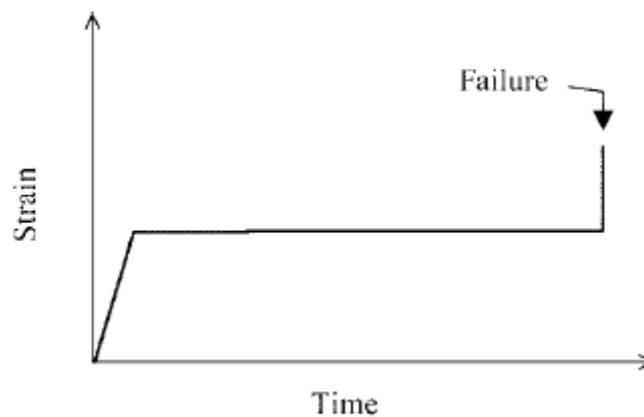


Figura 4.13 Curva de ruptra-fluencia del carbono

Para el diseño de se necesita saber cuál es la última carga que puede ser aplicada para que la tercera etapa no llegue a ocurrir.

Nivel de pretensado de CFRP 70% resistencia última a corto plazo para una vida útil de 100 años 55% en AFRP

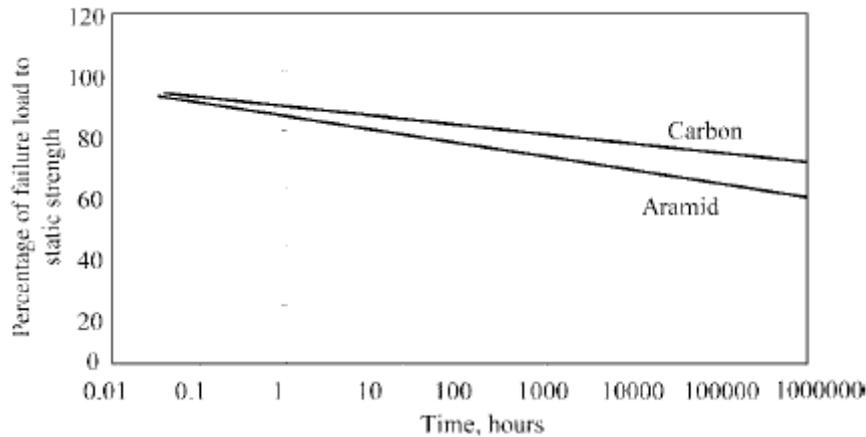


Figura 4.14 Curvas de rotura por fluencia

La Figura 4.14 obtenida extrapolando datos experimentales que duraron más de 12 mil horas en el que se aplicaron cargas entre el 50 y el 80% de la carga última. Al final del ensayo ningún tendón se rompió. Estos tendones después del ensayo fueron ensayados y la resistencia residual era del 90% de su capacidad estática original en CFRP y del 80% en AFRP

4.6.8 Pérdidas por relajación y fricción

Las pérdidas por relajación de los tendones de FRP ocurren por tres causas:

- Relajación del polímero.
- Enderezamiento de las fibras
- Relajación de las fibras.

Relajación del polímero. Cuando el tendón está inicialmente tensionado parte de la carga recae sobre la matriz de resina, con el tiempo la matriz se relaja y se pierde esta capacidad de contribución. Esto ocurre en las primera 24 a 96 horas y puede verse acelerado por el calor de curado del hormigón. Afectado por dos factores la relación modular que es el cociente entre el módulo elástico de la resina y el de la fibra, y la fracción volumétrica de fibras en el tendón.

Para las resinas utilizadas en pultrusión la relación modular es aproximadamente 1,5% para el carbón y 3% para la aramida. El volumen de resina está entre el 35 a 40% de la sección transversal del tendón. El total de relajación en esta primera fase es del rango del 0,6 al 1,2% de la transferencia de tensión. Esta pérdida por relajación se puede compensar con mediante un sobretensado. El sobretensado no está recomendado debido a que la pérdida no se produce en la fibras y estas pueden quedar sobredeformadas (overstrained)

Enderezamiento de las fibras. Las fibras en secciones pultrusionadas son prácticamente paralelas. Las fibras tensionadas fluyen a través de la matriz para estirarse. Este estiramiento aparece como una pérdida por

relajación. El estiramiento de las fibras depende del proceso de control de calidad de la pultrusión. Se considera entre un 1 y un 2% la relajación por esta causa a efectos de cálculo.

Relajación de las fibras. Depende del tipo de fibras. Las fibras de carbono no tienen relajación ($R_f=0$). Los materiales de aramida fluyen cuando son cargados y este comportamiento de fluencia se refleja en el comportamiento de relajación. La relajación a largo plazo ha sido constatada por DuPont entre el 1 y el 3 % por década. Asumiendo esta relajación y que ocurre desde el primer momento podemos asumir para la aramida una relajación de entre el 6 y el 18% en los 100 años de vida útil (Dolan 1989).

Ensayos de relajación (Zoch et al 1991). Realizó ensayos sobre cables de acero y de CFCC en condiciones equivalentes. En un periodo de 100 h la tensión se redujo en el CFCC un 2% mientras que en el acero se produjo una pérdida del 8%.

Ensayos de Santoh (1993) concluyó que la relajación para cables de CFCC es el 50% o menos que el acero.

Las pérdidas tradicionales asociadas a tendones pretensados, como fricción, acortamiento inicial elástico, fluencia del hormigón y fisuración pueden ser calculados de forma similar a los tendones de acero.

4.6.9 Aproximación global al diseño

Se escoge un nivel de pretensado del 40 al 50% de la resistencia del tendón como fuerza inicial de pretensado y se comprueba los niveles de servicio. Si cumple el diseño a flexión está completo, si no cumple se incrementa el número o tamaño de los tendones hasta que cumpla con los requerimientos de servicio. También se pueden utilizar tendones de FRP sin pretensar para incrementar la resistencia de la sección.

4.6.10 Ductilidad o deformabilidad

Los tendones de FRP y el hormigón son ambos materiales frágiles por lo que para la ductilidad clásica, la cual requiere de deformación plástica, es difícil de obtener. Las maneras de obtener un comportamiento cuasiductil son: confinar el hormigón en compresión, pretensado parcial, o permitiendo algún "bond Split".

Se ha demostrado que se puede mejorar la ductilidad de las vigas pretensadas con CFRP con una combinación de tendones internos adheridos y tendones exteriores sin adherir. A la inversa la deformabilidad se puede definir como la razón entre la última flecha y la flecha al fisurar. Usando esta última definición los elementos pretensados con FRP pueden tener una considerable deformabilidad.

Abdelrahman et al. (1995) propuso el índice de deformabilidad que depende de las deformaciones en la sección fisurada y las deformaciones últimas.

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_2}{\phi_1} \quad \text{o} \quad \mu_{\Delta} = \frac{\Delta_2}{\Delta_1}$$

Donde ϕ_1 y Δ_1 son la curvatura equivalente y la flecha, respectivamente, de la viga no fisurada con una carga igual a la carga última y ϕ_2 y Δ_2 son la curvatura y la flecha en el fallo de la viga.

Según Lees y Burgoyne(1999) la alta capacidad de rotación en vigas pretensadas con FRP es esencial para avisar del incipiente fallo. Estas grandes rotaciones se pueden conseguir pretensado no adherido o parcialmente adherido donde la rotación de la viga se concentra en unas pocas fisuras. Si los tendones están parcialmente adheridos entonces el sistema puede ser diseñado para que controlando las partes no adheridas controlemos el lugar donde se producen las fisuras. Así podemos conseguir una gran capacidad del momento último y una gran capacidad de rotación.

Referencia	Condición	Índice de deformabilidad	Última/pretensado inicial	Flecha máxima/luz	c/d ratio
Zhao (1994)	Bajo reforzado	2,3	2,0	1/36	0,269
Abdelrahman (1997)	Bajo reforzado	3,6	3,6	1/32	0,115
Abdelrahman (1997)	Sobre reforzado	4,4	3,6	1/32	0,345
Currier (1995)	Sobre reforzado	2,4	2,0	1/32	0,307

Tabla 4.7 Índices de deformabilidad

La deformabilidad es la clave para determinar la seguridad en las estructuras pretensadas con FRP. Algunos estudios han desarrollado el índice de deformabilidad. Este índice está creado para ser un punto de chequeo en el diseño de estructuras y no un largo y complicado procedimiento de diseño.

Hay dos dificultades. La primera es que el cálculo de la flecha para cargas puntuales o cargas uniformes en un solo vano es fácil de calcular pero para estructuras continuas y varias cargas requieres un riguroso análisis o un análisis mediante computadoras. El segundo es la dificultad de determinar la flecha bajo la última carga.

La forma más eficiente de obtener alta deformabilidad es reducir la deformación inicial del tendón de FRP lo que provee más deformación del tendón de reserva, más capacidad de flexión y mayor índice de deformabilidad. Limitando los valores de la fuerza de tesado a los valores de la Tabla 4.6 tenemos una deformabilidad aceptable.

La ductilidad como tal no es aplicable al FRP debido a que estos no tienen fluencia. Una serie de definiciones alternativas se han propuesto en la literatura.

Los datos indican que el método más eficaz de obtener una alta deformabilidad es reducir el pretensado inicial.

Reduciendo la deformación de pretensado inicial proveemos al tendón de más deformación de reserva, mayor curvatura y capacidad de deformación y un mayor índice.

Otro método para mejorar la deformabilidad, ductilidad o ambos es combinar el pretensado con tendones de FRP y refuerzo de acero no pretensado (Tung y Campbell 2002)

4.6.11 Refuerzo mínimo

La cantidad de armado pretensado y no pretensado deber ser el adecuado para resistir el factor de resistencia a flexión más grande que el menor de 1,5 veces la fuerza de fisurado o para la “tension-controlled” 1,5 veces el momento mayorado (CAN/CSA S806).

4.7 Servicio

4.7.1 Flecha.

Las tensiones admisibles especificadas en la Tabla 4.5 aseguran que no se excederá la resistencia a tracción, sin embargo es necesario asegurar que la flecha a corto y largo plazo será aceptable hasta el final de la vida útil de la estructura.

Para la deformación instantánea antes de la fisuración del hormigón el momento de inercia se puede usar para calcular las deformaciones con las ecuaciones de la resistencia de materiales. Después de la fisuración se pueden utilizar el método propuesto por ACI 440.1R.

Para las deformaciones a largo plazo podemos seguir el método convencional para hormigón pretensado con acero y luego aplicar los multiplicadores sugeridos por Currier 1995 y que podemos ver en la tabla

		Without composite topping	
		Carbon	Aramid
At erection	Deflection due to self-weight	1.85	1.85
	Camber due to prestress	1.80	2.00
Final	Deflection due to self-weight	2.70	2.70
	Camber due to prestress	1.00	1.00
	Deflection due to applied loads	4.10	4.00

Figura 4.15 Multiplicadores sugeridos para FRP

4.7.2 Ancho y espaciado de las fisuras.

Las fisuras están espaciadas y localizadas en los estribos. El ancho final de la fisura es aproximadamente tres veces comparado con el de las vigas de hormigón pretensado con acero

4.7.3 Fatiga

Es improbable que la fatiga sea un problema en elementos no fisurados como el rango de tensiones bajo repetidas cargas sea pequeño.

El examen de las vigas después de una carga estática hasta la rotura indican que los tendones fallaron en tensión como evidencia el fallo en "Straw boom" (escoba de paja). Todos los tendones de carbón fallaron cerca de la resistencia predicha podemos asumir que toda la resistencia a tracción fue desarrollada (el ciclo a flexión no tuvo efecto en el límite de resistencia a tracción del tendón)

La fatiga en las vigas es investigada para calcular el rango de tensión Δf_p producido en el tendón pretensado durante los ciclos de carga y comparar este rango de tensión con el obtenido de las curvas S-N (tensión-número de ciclos) para tendones pretensados.

Si el nivel de precompresión en los elementos de hormigón pretensado es suficiente para asegurar una sección no fisurada a lo largo de la vida útil del elemento, las características el refuerzo de pretensado y los anclajes no llegarán a ser factores críticos de diseño.

En los elementos pretensados de hormigón fisurados, sin embargo, las tensiones localizadas se incrementan en el refuerzo de pretensado a lo largo de las fisuras en las vigas pretensadas, preocupando la fatiga del refuerzo de pretensado en las vigas post-tesadas y la fatiga del tendón-anclaje llega a ser muy significativa.

ACI 215R Y PTI (Post-Tensioning Institute) 1990 recomiendan que el ensamblaje tendón-anclaje consistente en acero pretensado y el sistema de anclaje sea capaz de resistir sin fallo 500.000 ciclos de tensión variando del 60 al 66 % de la resistencia última del ensamblaje.

Iwamoto y al. (1993) realizó ensayos con dos tipos de tendones de pretensado con tres niveles de tensión inicial 40, 60 y 70% de la resistencia a tracción de la barra de FRP. Las vigas con tendones de aramida fallaron por ruptura del tendón, desarrollo de fisuras de adherencia y fallo por cortante. La resistencia a la fatiga a los 2 millones de ciclos fue no menor del 65% de la resistencia última estática de las vigas. La adherencia entre el hormigón y los tendones de aramida se deterioró más que en los especímenes que contenían cable a causa del rozamiento entre las fibras de aramida y el hormigón.

La resistencia a la fatiga del hormigón con tendones de aramida no puede ser predicha por los ensayos aislados de las barras de fibra de aramida. La rigidez de la viga no decrece mucho bajo las cargas cíclicas.

Aldelrahman i al (1995) ensayaron cuatro vigas pretensadas con CFRP (CFCC y Leadline™. La carga de fatiga se realizó con carga máxima igual a la carga de fisurado de la viga y el mínimo del 70% de la carga de fisurado. Después de 2 millones de ciclos las vigas se ensayaron estáticamente hasta la rotura. Los autores concluyeron que las vigas que sobrevivieron a 2 millones de ciclos de carga sin efectos medibles en la stiffness (resistencia, rigidez) de la viga.

Dolan y al. (2000) informó que vigas pretensadas con CFRP fisuradas no mostraron fallo de fatiga después de 3 millones de ciclos con tensión de tracción nominal de $0,5\sqrt{f'_c}$ MPa en el extremo de la fibra de la viga. Se observó un reblandecimiento de la viga pero las vigas no perdieron resistencia debido a la carga de fatiga.

Braimah (2000) ensayó vigas de hormigón pretensado con tendones de CFRP no adheridos. Solamente un tendón sobrevivió a los 2 millones de ciclos. La mayoría de tendones rompieron en la interfase tendón/anclaje cuando el rango de tensión de fatiga fue mayor de 100 MPa. El autor concluyó que los tendones totalmente no adheridos no son adecuados a la carga de fatiga debido a la concentración de tensiones en la unión tendón anclaje

4.8 Comportamiento a largo plazo

Las pérdidas a largo plazo de pretensado se calculan basándose en la fluencia y fisuración del hormigón y en la relajación de los tendones.

Las pérdidas en los tendones de FRP debido a la fluencia (creep) y el fisurado son menores que las correspondientes a las vigas pretensadas con acero debido al bajo módulo de elasticidad del FRP.

Las pérdidas por relajación son más problemáticas a causa de que hay pocos datos. Las características de la relajación varían con el tipo de fibra y generalmente son menores del 12% sobre la vida útil de la estructura (JSCE 1993).

Sen y al.(1999) examinaron vigas con tendones de AFRP pretensado bajo cambios de temperatura y condiciones de mareas y encontraron que los efectos combinados fueron en detrimento del rendimiento de dichas vigas. La pérdida de momento se incrementó con el tiempo de exposición variando entre el 43 y el 53% en los primeros 21 meses.

Los primeros resultados de los ensayos a largo plazo mostraron que el FRP pretensado mostraba un comportamiento similar al pretensado con acero. Las deformaciones a largo plazo dependen del tipo de fibra y fueron a menudo mayores que las pretensadas con acero. Currier (1995) encontró que las deformaciones a largo plazo podían ser predichas usando los métodos convencionales desarrollados para el pretensado con acero, no obstante con algunas modificaciones.

Matthys y Taerwe (1998) ensayaron losas pretensadas con cables de acero y con tendones de AFRP. Las deformaciones con AFRP fueron mayores debido al bajo módulo elástico de AFRP y las mayores relajaciones características de los tendones de AFRP.

Braimah y al. (1999b) y Braimah (2000) ensayó vigas pretensadas con tendones de CFRP y pretensadas con cables de acero con cargas sostenidas durante más de dos años. El comportamiento a largo plazo fue muy similar. También desarrollo un modelo para predecir las flechas a largo plazo.

4.9 Cortante

El uso de FRP como refuerzo a cortante en vigas pretensadas con tendones de FRP no ha sido suficientemente investigado. Aproximación racional a las expresiones del ACI 318-02

Cuestiones que necesitamos saber cuándo usamos FRP como refuerzo a cortante.

- FRP puede tener un relativamente bajo módulo de elasticidad
- Alta resistencia a tracción y no deformación plástica
- La resistencia a tracción de la parte curva es significativamente más baja que en la parte recta
- FRP tiene más baja “dowel resistance” y resistencia a tracción en cualquier dirección que no sea la dirección de las fibras
- Las características de adherencia de los estribos de FRP pueden variar significativamente de los armados con acero.

ACI 318-02 el espaciado será menor a $0,75h$ o 600 mm. Estas distancias se reducen a la mitad cuando V_{frp} excede en $2V_c$

Canadian Highway Brige Desing limita la deformación a tracción en el refuerzo a cortante en 0,002.

Estas dos condiciones aseguran que las fisuras son relativamente pequeñas y uniformemente distribuidas en el elemento.

Para estribos de FRP el máximo espaciado debería ser de $d/2$ o 600 mm como sugiera la ACI-318-02 para elementos no pretensados.

Las previsiones de la ACI-318-02 en lo referente a anclaje y adherencia de los estribos no se pueden tener en cuenta debido las diferentes propiedades mecánicas del acero respecto al FRP.

La resistencia a tracción de la parte doblada de los estribos de GFRP están principalmente influidas por el radio de curvatura y el diámetro de la barra, la longitud de solape y no menos exento la resistencia del hormigón.

Los ensayos de (citar) demuestran las barras con r/d_b próximo a cero las barras de refuerzo a cortante fallaron con cargas muy bajas en la parte doblada.



Figura 4.16 Radio mínimo y longitud de la patilla.

Recomendaciones

- Radio mayor o igual a tres veces el diámetro de la barra
- Estribos cerrados con ganchos a 90 grados
- La longitud de la patilla como mínimo 12 veces el diámetro de la barra.

4.10 Adherencia y desarrollo

4.10.1 Introducción.

En primer lugar definiremos la longitud de transferencia como la longitud entre el extremo del miembro donde la tensión en el tendón es igual a cero y el punto del tendón donde la pretensión es totalmente efectiva; también llamada longitud de transmisión. Por otro lado tenemos la longitud de desarrollo es la longitud de empotramiento requerida para desarrollar la resistencia de diseño de la armadura en una sección crítica; anteriormente se le llamaba longitud de adherencia.

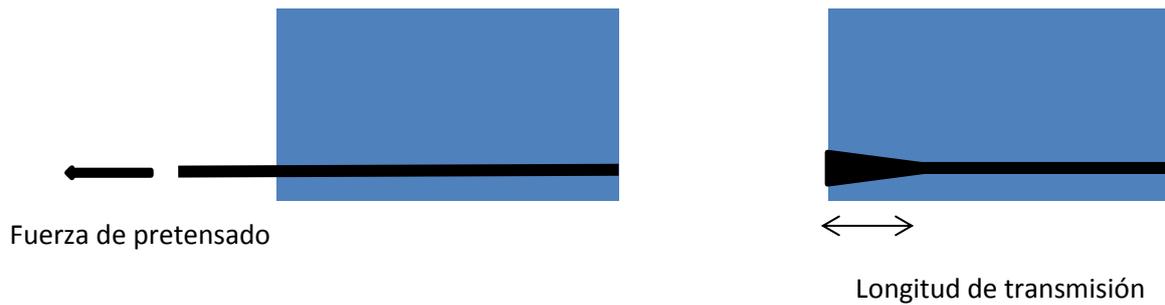


Figura 4.17 Longitud de transmisión.

En ambas longitudes tanto de transferencia como de desarrollo en los tendones de FRP son función de la configuración del perímetro y la superficie del tendón, la tensión en el FRP, el método para transferir la fuerza del FRP al hormigón y la resistencia y el recubrimiento de hormigón. El mecanismo de adherencia difiere entre el FRP y el acero debido a las diferencias en las formas, tratamiento de la superficie y el módulo elástico.

En general el cable con una superficie rugosa, irregular requerirá una longitud de transferencia más corta que uno liso.

La longitud de transferencia será mayor si la liberación de tensión es repentina que si es gradual. Un pretensado inicial más alto en el tendón requerirá una longitud de transferencia más grande.

En general, la adherencia de tendones FRP podría estar influida por (de ACI 440R):

- Resistencia a tracción (600 a 3000 MPa)
- Módulo de elasticidad (40 a 170 GPa)
- efecto Hoyer – en el hormigón pretensado, fuerzas friccionales que ocurren como resultado de la tendencia de los tendones a recuperar el diámetro que tenían antes de ser pretensados.
- Forma de la sección transversal
- Acabado superficial
- Tipo y volumen de la fibra o la matriz
- Método de la transferencia de carga
- La resistencia del hormigón y del recubrimiento

Tanto la longitud de transferencia como la longitud de desarrollo varían bastante con los diferentes tipos de fibras y configuraciones de tendón

4.10.2 Longitud de transferencia

Como ya hemos definido en el apartado anterior la longitud entre el extremo del miembro donde la tensión en el tendón es igual a cero y el punto del tendón donde la pretensión es totalmente efectiva.. La transferencia ocurre gradualmente aumentando desde cero hasta la situación donde la adherencia se inicia y se incrementa gradualmente hasta alcanzar un valor constante y un nivel de pretensado efectivo.

4.10.2.1 Aramida

A continuación detallamos algunos casos para la longitud de transferencia para diferentes tipos de fibra.

AFRP (FIBRA) 25% carga última 300 a 400 mm y para 50% carga última 250 a 550 mm. La longitud de transferencia varía según el diámetro nominal de las barras y está entre los 30 o 40 diámetros. Los autores de los ensayos concluyeron que el principal mecanismo de adherencia de las fibras de aramida es la fricción. Estas fibras muestran un ligero deslizamiento del tendón comparado con el que se produce en el acero.

Arapree 6 diámetros la longitud de transferencia

Nelson 1997 FIBRA 33 diámetros, Technora 43, Arapree 50 diámetros. Para esta última la longitud de transferencia se ve afectado por el nivel de pretensado.

Lu et Al (2000) ensayaron con Technora obteniendo una longitud de transferencia de entre 45 a 47 diámetros

4.10.2.2 CFRP Carbono

Domenico (1995) investigó la longitud de transferencia y las características de adherencia de cables de CFCC. Las variables que estudio fueron el canto de la viga, el diámetro de los tendones, los recubrimientos de hormigón y la resistencia del mismo y el nivel de pretensado. En las medidas realizadas se encontró que la longitud era proporcional al diámetro de la barra y al nivel de pretensado.

Mahmoud and Rizkalla (1996) estudiaron las características de cables de CFCC y Leadline y encontraron que la longitud de transferencia era de entre 50 a 80 diámetros.

Un resumen de estos y datos los podemos ver en la Tabla 4.8 en la que es el cociente entre la longitud de transferencia y el diámetro de la barra para una determinada relación entre la tensión última y la tensión aplicada.

Material	Tipo	Diametro (mm)	Módulo de Yount (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)	f_{pe}/f_{pu}	L_i/d_b	L_d/d_b
	Arapree	9,9	127.600	2450	0,5 a 0,7	16 a 50	100
	FIBRA	10,4	48.270	1430	0,4 a 0,6	20 a 50	90
	Technora	7,4	68.600	1720	0,6	50	140
	Leadline	7,9	149.600	1980	0,5 a 0,7	50 a 80	175
	CFCC	8,3	137.200	2220	0,5 a 0,7	50	N/A

Tabla 4.8 Longitudes de desarrollo y transferencia para tendones de FRP (ACI 440.4R-04 2004)

4.10.2.3 Longitud de adherencia a flexión

En este campo cabe destacar los ensayos realizados por Nanni y Tanigaki (1992) que estudiaron la longitud de desarrollo y la longitud de adherencia a flexión en tendones de AFRP. Lu et al (2000) que ensayaron tendones de Technora®. Nelson (1997) que ensayó tendones de aramida y carbono concluyendo que las longitudes de desarrollo para tendones similares de acero eran conservadoras para tendones de AFRP pero no adecuadas para los tendones de carbono Leadline™

Un resumen de estos datos lo podemos ver en la última columna de la tabla Tabla 4.8 en que L_d/d_b representa la relación entre la longitud de desarrollo y el diámetro de la barra.

4.10.3 Recomendaciones de diseño

La mayoría de ensayos para la determinación de las longitudes de anclaje se realizan mediante “direct pullout” (extracción directa). Estos ensayos indican que el principal factor limitante de la capacidad de adherencia del tendón es el fallo de la superficie del tendón.

No hay regla general para el espaciado de tendones o el recubrimiento por lo que el diseñador deberá seleccionar la separación de tendones basándose en el tendón específico elegido.

4.11 Tendones no adheridos y sistema de tendones externo.

4.11.1 Elementos pretensados no adheridos.

Para predecir la resistencia de una viga post-tensada con tendones de FRP no adheridos, es necesario para determinar la tensión en los tendones pretensados en el fallo de la viga, la siguiente relación

$$f_p = f_{pe} + \Delta f_p$$

donde f_{pe} es el pretensado efectivo en el tendón cuando la viga sólo soporta su propio peso después de que ocurran las pérdidas de pretensado y Δf_p es el incremento de tensión debido a la aplicación de cualquier carga adicional. La inclusión del peso propio y las pérdidas es importante porque cuando calculamos las pérdidas de pretensado necesitamos determinar el valor final de la fuerza de pretensado, el peso momento del peso propio es considerado activo para estimar las pérdidas de fluencia. No hay compatibilidad entre la

deformación en tendones pretensados no adheridos y el hormigón en cada sección del elemento. El incremento de tensión en el tendón debido a la carga aplicada debería ser evaluado por considerando la deformación del elemento entero, más bien que en una sección, como para un elemento consolidado.

Algunos intentos de los investigadores se han realizado para estimar la tensión en el tendón en diferentes condiciones de carga, especialmente en última resistencia a flexión para el hormigón en elementos pretensados con tendones de acero no adheridos. La principal diferencia entre el acero no adherido y los tendones de FRP es el módulo de elasticidad. De este modo, los modelos para tendones de acero no adherido sirven como base para el desarrollo de las guías para tendones de FRP no adheridos. Un método basado en el cálculo de la deformación de la sección crítica (momento máximo) fue propuesto por Naaman (1987) y más tarde extendido para tendones de FRP (Naaman 2002). El método asume la compatibilidad de deformaciones, como si los tendones estuvieran adheridos, y aplica un factor de reducción de la deformación Ω para calcular por el hecho de que los tendones no están adheridos.

El coeficiente de reducción de la deformación en la carga última Ω_u depende de una serie de variables como son: la configuración de la carga, la extensión de las fisuras en la viga y varía teóricamente entre 0 y 1,0. El valor 1.0 corresponde al tendón adherido. Valores sugeridos por Alkhairi (1991) basados en análisis de regresión lineal de 143 vigas ensayadas.

Estudios en Queen's University indican que las expresiones para el cálculo de Ω_u propuestas por Alkhairi (1991) son aplicables a vigas que contienen tendones CFRP no adheridos con una longitud mayor de 15 veces la profundidad de la viga. (supongo que se referirá a la profundidad efectiva)

4.11.2 Pretensado externo

4.11.2.1 General.

El sistema de pretensado externo consiste en tendones no adheridos situados fuera de la sección transversal y post-tesados contra anclajes y desviadores agregados a la viga o construidos dentro. Los tendones pueden estar en el exterior o en el hueco de una sección en forma de caja.

Ventaja: reducción del peso propio debido a la reducción del espesor ya que no se eliminan los conductos internos, es más fácil su inspección y reemplazamiento de los tendones dañados y mejora la resistencia a cortante ya que elimina los conductos internos.

Desventajas: el sistema de anclaje para el postesados y la estabilidad lateral de la viga durante el post-tesado. Los tendones están expuestos a daños durante la construcción y durante la vida útil de la estructura.

Se pueden utilizar tendones rectos y curvos. En los tendones curvos se necesitan elementos para mantener en su sitio y elementos para transferir la fuerza de pretensado dentro de la viga.

Los tendones externos pueden ser una manera más efectiva de aprovechar las propiedades del FRP. El tendón no adherido es mucho menos estirado que el tendón adherido y su comportamiento frágil puede ser menos crítico que en un tendón adherido. Sin embargo, los tendones dependen del comportamiento del anclaje y están completamente expuestos a daños potenciales. Además la contribución del tendón no adherido a la resistencia a flexión del elemento es significativamente menor que la del tendón adherido.

CSA S6 permite tendones de FRP como elemento principal de sistema externo de postesado. Los límites de tensión de los tendones externos son ligeramente más bajos que para los tendones adheridos. Los tendones de GFRP son permitidos con lechadas no alcalinas.

En el pretensado externo hay que tener especial atención al anclaje que sujeta el cable y la interacción de este con las guías.

Se observa una pequeña reducción de la resistencia del cable de CFCC cuando el ángulo de curvatura es menor o igual a 10 grados (Santoh 1993). Para reducir la fricción entre los tendones y las guías se puede usar un material de cojín o Teflon.

En un estudio comparativo del comportamiento de elementos de hormigón pretensado con tendones internos no adheridos y tendones externos de FRP, Burgoyne (1992) hizo ensayos con Parafil®. La viga reforzada internamente no colapsó completamente pero la pretensada externamente colapsó completa y repentinamente con una pérdida total del pretensado. Como consecuencia de estos ensayos se propuso que el tendón externo pretensado debería pasar por unos anillos para que en caso de fallo los tendones se vieran obligados a deformarse con la viga.

Otros estudios para tendones externos de FRP concluyeron que estas vigas con tendones externos podían resistir 2 millones de ciclos de carga para fatiga.

Horiguchi et al (1995) estudió el efecto de la temperatura en la fatiga. Encontraron que la resistencia última a flexión mejoró, mientras que su dureza a la fractura disminuyó a baja temperatura. En los ensayos solo falló a tensión el acero. La resistencia de los cables de pretensado exterior disminuyó a baja temperatura.

Grace y Abdel-Sayed (1996a,b). Proponen un sistema consistente en una viga prefabricada de hormigón en doble T cubierta con las losas del tablero. El sistema estaría armado con barras de GFRP y pretensado interna y externamente con tendones curvados de CFRP. Los resultados prometen aproximarse a producir

ductilidad, sin fisuras. El sistema ha demostrado la capacidad de soportar 7 mill de ciclos con una carga del 60% de la carga última sin cambios significativos estática ni dinámicamente.

4.11.2.2 Internos vs. Externo.

Se produce un cambio de excentricidad de la viga. Esto cambia como se incrementa la carga hasta llegar a la carga última. Esto hace que sea necesario investigar cómo se deforman los elementos pretensados externamente a través de los estados de carga.

4.11.2.3 Consideraciones de diseño.

El efecto del tendón doblado en los puntos de guía (deviator points) debe ser considerado cuando usamos FRP como tendones externos. Deben diseñarse elementos de guía (saddle) para evitar inducir puntos de concentración de tensiones, proveyendo al sistema de curvatura limitada, fricción y de suficiente área para evitar las tensiones laterales.

Figura 7.2 relación entre la resistencia a tracción del tendón CFCC y el ángulo de curvatura con el que se ha doblado el tendón. Se observa una reducción de la resistencia conforme aumenta el radio de curvatura que es similar a la vista en el apartado 3.9 (Corrección de la tensión en tendones doblados). Esta reducción de la resistencia se puede reducir flaring los tendones en los puntos de harp (contacto?), reduciendo la fricción entre el tendón el mecanismo de guía y almohadillando el elemento de guía con un material de baja densidad polietileno (PE). Esto es particularmente importante cuando el ángulo de doblado es mayor de 5 grados.

Los tendones externos han sido diseñados para asegurar el pretensado longitudinal de la viga y generalmente representan solo una parte del refuerzo total a flexión. El restante refuerzo puede consistir en refuerzo de pretensado interno, armado no pretensado o una combinación de ambos. Una cuantía mínima de refuerzo adherido es necesaria para el control y distribución de las fisuras y limitar su anchura.

4.11.2.4 Tensión última en tendones pretensados externos no adheridos.

Aravinthan and Mutsuyoshi (1997) han investigado sobre la tensión en tendones pretensados externos no adheridos de acero y han notado que la excentricidad puede tener una influencia significativa en la resistencia última. Como resultado de estos estudios han introducido el concepto de factor de reducción de la profundidad R_d para estimar la profundidad efectiva de en el tendón externo. Y que depende de la longitud el vano y del espaciado de las guías del tendón

La influencia del cambio de excentricidad de los tendones externos durante la carga en el cálculo de la tensión última ha sido corroborada por Rao and Mathew (1996) and Tan and Ng (1997). La aplicación de las ecuaciones de este apartado para tendones de FRP pretensado necesita ser establecida todavía.

4.12 Necesidades de investigación.

Tendones y sistemas de anclaje. La falta de un tendón y sistema de anclaje comercial es el mayor impedimento de la industria. Sin un sistema comercial, cada proyecto requiere un gran esfuerzo de investigación que repercute en la economía de los tendones de FRP.

Anclajes. Los anclajes necesitan un desarrollo en ciertas áreas. Un anclaje para uso en obra. La fatiga en anclajes para tendones no adheridos.

Protección frente al fuego. Algunas fibras de carbono pueden tener una resistencia al fuego de 1000 °C. Las resinas en general son muy sensibles al calor.

Equipos de doblado (curvado). La maquinaria habitual es inadecuada para el doblado de las barras de FRP. Hace falta desarrollar nuevos.

Adherencia a largo plazo. La adherencia del tendón de FRP depende de la superficie de la resina. Ya hay alguna experiencia con barras de acero recubiertas con resina de epoxy la durabilidad a largo plazo y la adherencia de los tendones de FRP todavía no ha sido definida.

Acción galvánica. Las fibras de carbono están más altas en la tabla galvánica que el acero creando un problema potencial de corrosión. El recubrimiento de resina puede excluir este comportamiento pero debe ser investigado.

Post- tensionado externo para rehabilitación. El bajo módulo elástico del FRP hace más atractivo el tensionado de tendones cortos de FRP. La falta de un sistema de anclaje-tendón es la clave para esta aplicación

Sustitución de un tendón de FRP. La sustitución de tendones en estructuras corroídas es un área de aplicación con gran potencial. El diseño de un tendón adecuado para conductos existentes y la función sobre tendones doblados (no lo entiendo) necesita ser resuelto.

Depósitos circulares pretensados. Desarrollo de guías de diseño para depósitos circulares de cables de FRP enrollados.

Procedimientos de tensado.

Valoración de la fiabilidad. Los coeficientes de reducción de resistencia necesitan ser recalibrados para asegurar la conformidad con los factores de carga de ACI 318-02

Capacidad a cortante. Se necesita más desarrollo en las guías para vigas pretensadas con tendones de FRP con tendones de FRP.

Adherencia y desarrollo. Protocolos para la validación de la longitud de transferencia y la longitud de desarrollo de los tendones de FRP

4.13 Demostraciones de campo y construcciones.

Durante el final de los 80 y durante los 90 algunos proyectos han mostrado el potencial de las aplicaciones del pretensado con FRP.

1988 Puente Marienfelde en Berlín. Primera estructura construida en Alemania desde 1945 con tendones de FRP externos no adheridos. Tendones Polystal® de fibra de vidrio. Cada tendón tiene un carga de trabajo de 600 kN y un diámetro de 7.5 mm



Figura 4.18 Puente Marienfelde de Berlin (Telford 2002)

El puente BASF en Ludwigshafen en Alemania (Zoch y al. 1991). Tendones de CFRP en combinación con 16 tendones tradicionales de acero. Fueron usados como tendones internos no adheridos y post-tensionados. Los tubos donde se alojaron los cables de acero fueron rellenos con lechada mientras que los de los cables de FRP no para permitir la inspección, el cambio de tendones y la recolección de datos.

1993 Puente en Calgary (Canadá). (Rizkalla y Tadros 1994). Usa tendones pretensados de FRP e incorpora sensores de fibra óptica. Este fue el primer puente de este tipo en Canadá y uno de los primeros en el mundo.

1997 Taylor Bridge en Headingly, Manitoba. Tendones pretensados de FRP.



Figura 4.19 Taylor Bridge Manitoba(www.panoramio.com)

2001 Puente Street Brigde en Southfield, Michigan EE.UU. Usa cables pretensado de CFRP adheridos y no adheridos tanto en la dirección longitudinal como en la transversal (Grace y al. 2002). Pretensado usando cables Leadline.

En la Tabla 4.9 se exponen los puentes construidos desde los años 80 hasta la actualidad. Clasificada cronológicamente. Se basa en los datos recopilados por Pawel en 2011 y que se incluyen en la tesis de master de Benavent 2012

Nombre del puente	Localización	País	Sistema	Año	Caract.
Lunenschegasse Bridge	Dusseldorf	Alemania	tendones	1980	Long: 6,4 m. Ancho: 6,1 m. Desarrollado por Bayer AG
Ulenbergstrasse Bridge	Dusseldorf	Alemania	tendones	1986	Long: 46,9 m. Ancho: 14,9 m. Desarrollado por Bayer AG
Shinmiya Bridge	Ishikawa	Japón	tendones	1988	Long: 6,1 m. Ancho: 7,0 m. Desarrollado por Tokyo Rope
Marienfelde Bridge.	Berlin	Alemania	tendones	1988	Long: 50,3 m.

Nombre del puente	Localización	País	Sistema	Año	Caract.
					Ancho: 4,6 m. Desarrollado por Bayern AG
Nakatsugawa Bridge	Chiba	Japón	tendones	1989	Long: 7,9 m. Ancho: 2,4 m. Desarrollado por Tokyo Rope Mfg. Ltd.
Bachigawa Minami Bridge	Fukuoka	Japón	tendones	1989	Long: 36,0 m. Ancho: 12,2 m. Desarrollado por Mitsubishi Chemical.
Kitakyushu Bridge		Japón	tendones	1989	Long: 35,9 m. Ancho: 12,2 m.
Birdie Bridge	Ibaraki	Japón	tendones	1990	Long: 54,6 m. Ancho: 2,1 m. Desarrollado por Tokyo Rope Mfg. Ltd. and Mitsubishi Chemical
Talbus Bridge	Tochigi s	Japón	tendones	1990	Long: 9,5 m. Ancho: 5,5 m. Desarrollado por Shinko Wire Co
Sumitomo Demonstration Bridge -1 Oyama Works,	Tochigi	Japón	tendones	1990	Long: 12,5 m. Ancho: 4,0 m. Desarrollado por Teijin Ltd.
Sumitomo Demonstration Bridge -2 Oyama Works,	Tochigi	Japón	tendones	1990	Long: 25,0 m. Ancho: 4,0 m. Desarrollado por Teijin Ltd.
Notsch Bridge Notsch,	Karnten	Austria	tendones	1990	Long: 43,9 m. Ancho: 11,9 m. Desarrollado por Bayer AG
Access Road to Rapid City Cement Plant	Rapid City	USA, South Dakota	tendones	1991	Long: 9,1 m. Ancho: 5,2 m. Desarrollado por South Dakota School of Mines.
Bridge #15 Hakui Kenmin Bicycle Route	Ishikawa	Japón	tendones	1991	Long: 10,7 m. Ancho: 4,3 m. Desarrollado por Tokyo Rope Mfg. Ltd.
Rainbow Bridge	Tokyo Japón	Japón	tendones	1991	Desarrollado por Shinko Wire Co.

Nombre del puente	Localización	País	Sistema	Año	Caract.
Schiessbergstrasse Bridge	Leverkusen	Alemania	tendones	1991	Long: 53,0 m. Ancho: 9,8 m. Desarrollado por Bayer AG
Oststrasse Bridge	Ludwigshafen	Alemania	tendones	1991	Long: 81,7 m. Ancho: 11,3 m. Desarrollado por Tokyo Rope.
Takahiko Pontoon Bridge.	Ibaraki	Japón	tendones	1992	Long: 73,2 m. Ancho: 3,0 m. Desarrollado por Shinko Wire Co
Amada Bridge	Ishikawa	Japón	tendones	1992	Long: 7,3 m. Ancho: 3,4 m. Desarrollado por Tokyo Rope Mfg. Ltd.
Hishinegawa Bridge / Hakui Kenmin Bicycle Route	Ishikawa	Japón	tendones	1992	Long: 14,0 m. Ancho: 12,2 m. Desarrollado por Tokyo Rope.
Yamanaka Bridge.	Tochigi	Japón	tendones	1993	Long: 9,4 m. Ancho: 5,5 m. Desarrollado por Shinko Wire Co. Ltd
Slab Bridge	Mie	Japón	tendones	1995	Long: 10,7 m. Ancho: 3,7 m. Desarrollado por Tokyo Rope Mfg. Ltd
Sone Viaduct	Hyogo	Japón	tendones	1995	Desarrollado por Teijin Ltd.
Mukai Bridge	Ishikawa	Japón	tendones.	1995	Long: 14,9 m. Ancho: 14,3 m. Desarrollado por Tokyo Rope
Storchenbruecke	Winterthur	Suiza	tendones	1996	Long: 123,7 m. Ancho: 6,1 m. Desarrollado por BBR Ltd.
Seisho Bridge Bridge.	Kanagawa	Japón	tendones	1996	Long: 10,7 m. Ancho: 3,7 m. Desarrollado por Tejin, Ltd
Milbridge Bridge	Milbridge	USA, Maine	tendones	1997	Long: 4,9 m. Ancho: 7,3 m. Desarrollado por South Dakota School of Mines.

Nombre del puente	Localización	País	Sistema	Año	Caract.
Herning Stibro	Herning	Dinamarca	tendones	1999	Long: 79,9 m. Ancho: 3,0 m.
St. Johns Street Bridge	St. James	USA, Missouri	tablero, tendones	2000	Long: 8,2 m. Ancho: 7,9 m. Desarrollado por Kansas Structural Composites, Inc.
Jay Street Bridge	St. James	USA, Missouri	tablero, tendones	2000	Long: 8,2 m. Ancho: 7,9 m. Desarrollado por Kansas Structural Composites, Inc
St. Francis Street Bridge	St. James	USA, Missouri	tablero, tendones	2000	Long: 7,9 m. Ancho: 8,5 m. Desarrollado por Kansas Structural Composites, Inc
Parker @I-225 Bridges	Denver	USA, Colorado	tendones	2000	Long: 10,7 m. Ancho: 11,0 m. Desarrollado por MarshTodo compuesto Industries Composites.
Bridge St Bridge over Rouge River	Southfield	USA, Michigan	tablero, tendones	2001	Long: 60,4 m. Ancho: 9,1 m. Desarrollado por Mitsubishi Chemical.
Route 141 over Willow Creek	Guthrie	USA, Iowa	tendones	2001	Long: 64,0 m. Ancho: 7,9 m. Desarrollado por Fiber Reinforced Systems
Ikeishima Island Bridge	Okinawa	Japón	tendones	2001	Long: 37,8 m. Ancho: 4,0 m.
I-225 & SH83 Interchange	Aurora	USA, Colorado	tendones	2002	Long: 410,0 m Ancho: 12,8 m. Desarrollado por Hughes Bros., Inc.
Passerelle de Laroin	Laroin	France	tendones	2002	Desarrollado por Soficar.

Tabla 4.9 Puentes construidos con FRP desde los años 1980 (Benavent 2012)

5 Parte experimental

En este apartado se pretende exponer de forma breve una experimentación que se llevó a cabo en el departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia Departamento concretamente en una tesis de master denominada “Diseño de ensayo para el estudio de propiedades mecánicas de barras FRP” Metodología del ensayo.

En esta parte experimental fue objeto de estudio la caracterización de barras GFRP (Glass Fiber Reinforcement Polymer) para su uso posterior como tendón en estructuras de hormigón pretensado.

Metodología del ensayo

Como equipo de ensayo se utilizó el bastidor ECADA perteneciente al departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil para realizar los ensayos de tracción de la barra. Ensayos basados en la Norma “Guide Test Methods for FRPs for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures”, ACI 440.3R-04 ACI.

En la Figura 5.1 se muestra un esquema del bastidor ECADA.

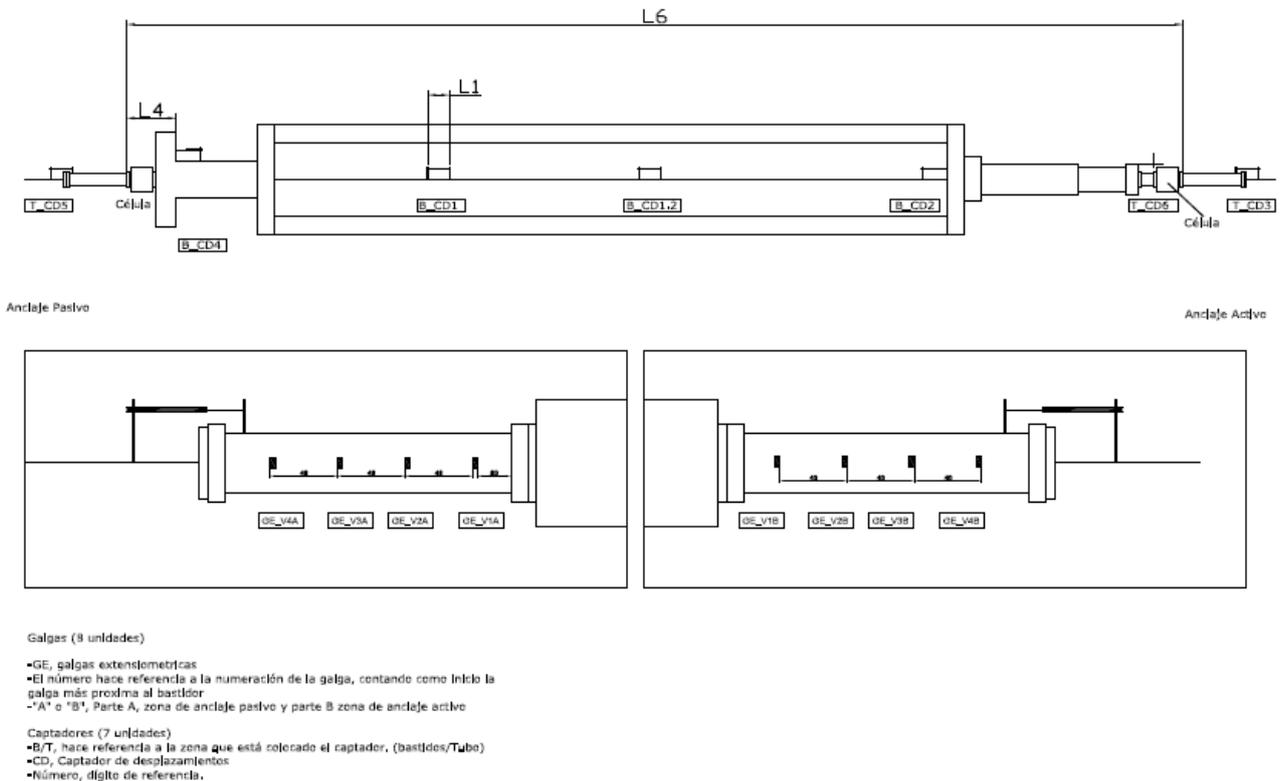


Figura 5.1 Esquema bastidor ECADA, longitudes, captadores, galgas y nomenclatura.(Benavent Serra 2012)

Como ya se ha especificado la barra objeto del ensayo era de GFRP. Se muestra en la tabla 5.1 las características mecánicas de este tipo de barras suministrada por una empresa de materiales poliméricos.

Ensayo	L. Anclaje	Det	Φ anclaje	Área barra	Cél. An. Pasivo	Cél. An. Activo	Captadores	Galgas
150-1	150	1	35	79,174	8B	23B	7	8
150-2	150	2	35	79,174	5	24B	7	8
100-1	100	1	35	79,174	8B	23B	7	6
100-2	100	2	35	79,174	5	24B	7	6
50-1	50	1	35	79,174	8B	23B	7	4
50-2	50	2	35	79,174	5	24B	7	4

Tabla 5.1 Parámetro de ensayo (Benavent Serra 2012)

El tipo de anclaje utilizado es el que está definido en el ACI 440-4R -04 como camisa recta que consiste en un cilindro metálico en el que se embebe el tendón y rellenado con un mortero expansivo para anclajes y rellenos y de alta adherencia en áreas confinadas y de altas resistencias, monocomponete, fluido, de retracción compensada y ligeramente expansivo, a base de cemento. El anclaje utilizado

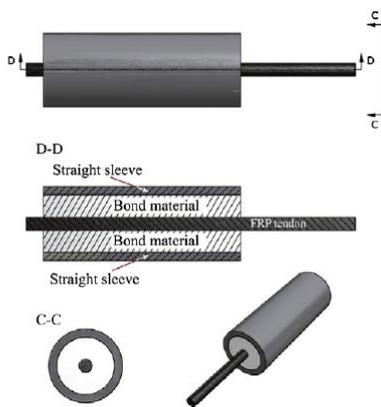


Figura 5.2 Anclaje de camisa recta (Schmidt et al. 2010)



Figura 5.3 Tubo y tapa de anclaje (Benavent Serra 2012)

Las barras se instrumentaron con captadores de desplazamiento y galgas extensiométricas utilizadas estas para medir la deformación perimetral del tubo de anclaje.



Figura 5.4 Detalles del bastidor ECADA y de la galga extensiométrica

Los ensayos que se llevaron a cabo fue el ensayo de obtención del área transversal y el área equivalente de la barra polimérica según lo establecido en ACI-

Se realizó un ensayo sobre 10 probetas.

Seguidamente se procedió a realizar un ensayo de tracción sobre 6 probetas.

Parámetros de ensayo que se determinaron para caracterizar la barra fue la longitud de anclaje

Ensayo	L. Anclaje	Det	Φ anclaje	Área barra	Cél. An. Pasivo	Cél. An. Activo	Captadores	Galgas
150-1	150	1	35	79,174	8B	23B	7	8
150-2	150	2	35	79,174	5	24B	7	8
100-1	100	1	35	79,174	8B	23B	7	6
100-2	100	2	35	79,174	5	24B	7	6
50-1	50	1	35	79,174	8B	23B	7	4
50-2	50	2	35	79,174	5	24B	7	4

Tabla 5.2 Parámetro de ensayo (Benavent Serra 2012)

En todos los casos en los que falló la barra se observa que el fallo es frágil a partir de cierto nivel de carga. Es decir no tiene rama elástica. Esta carga va desde las 4,14 T a 5,02 T lo que se traducen en tensiones de entre 530 y 616 MPa. Estos valores coinciden dentro del rango expuesto en la bibliografía.



Figura 5.5 Rotura de la barra de GFRP (Benavent Serra 2012)

Como conclusión a todos estos ensayos la curva tensión-deformación, como era previsible, muestra el comportamiento elástico del material con una rama recta ascendente, obteniéndose un deformación en rotura. del 15 por mil.

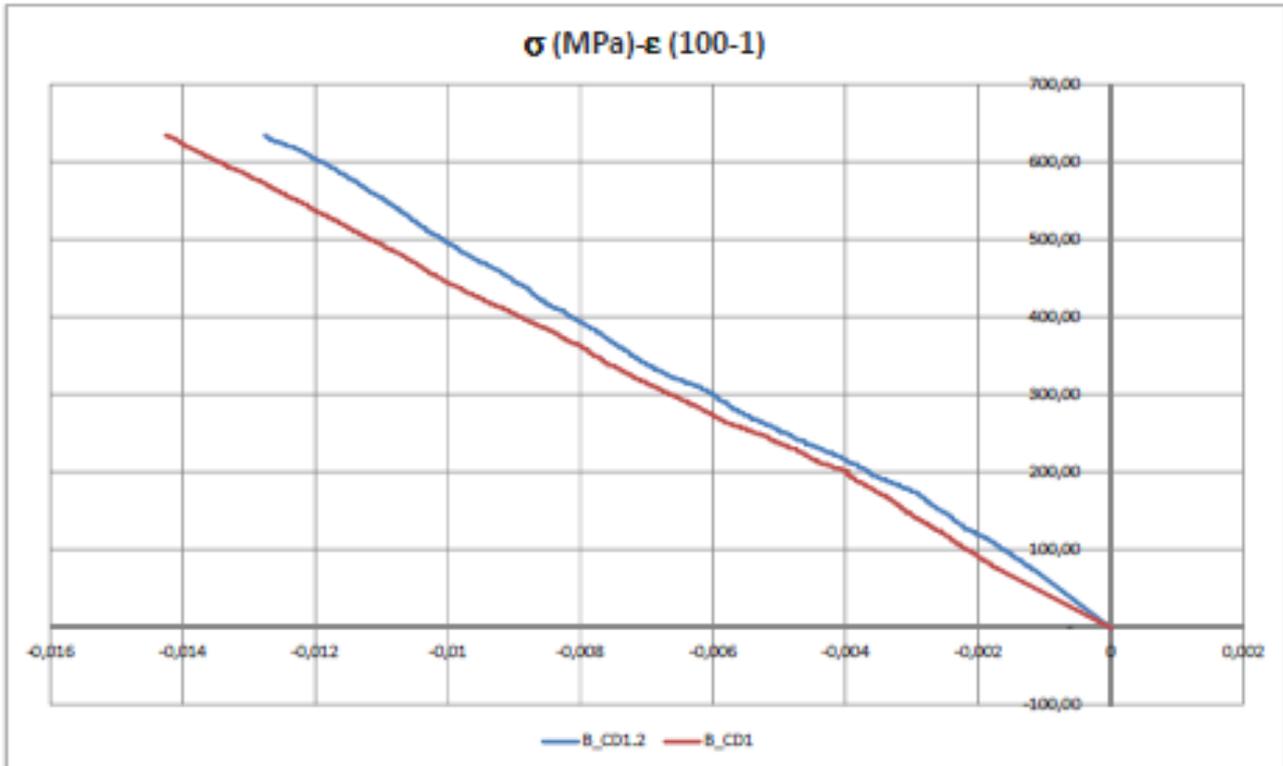


Figura 5.6 Diagrama Tensión-Deformación ensayo 100-1(Benavent Serra 2012)

6 Conclusiones

Como resultado de la revisión bibliográfica se ha detectado que la mayor parte de investigación está concentrada en los EEUU, Canadá y Japón siendo órganos como ACI en Estados Unidos en su comité 440, ISIS Canadá o la JSCE japonesa los que aglutinan estos esfuerzos publicando guías de diseño en informes sobre los FRP en pretensado.

También se ha detectado una concentración de la actividad investigadora desde finales de los años 1980 hasta mediados de la primera década de este siglo. Se ha detectado que la norma ACI 440-4R-04 ha sido reprobada en el año 2011 sin ningún cambio desde su publicación y que la guía para el diseño de estructuras con hormigón pretensado canadiense es la publicada en 2007.

Con respecto a las aplicaciones de los tendones FRP en hormigones pretensados la totalidad de las aplicaciones están dentro de la ingeniería civil. También se ha detectado que la mayor parte de estas aplicaciones se realizó a finales de la década de los noventa y principios del siglo XXI según la bibliografía consultada. Sí que hay aplicaciones de FRP para la ingeniería civil pero en otras modalidades que no son tendones para pretensado.

Todavía queda muy lejos que la utilización del FRP en tendones para hormigón pretensado se generalice como lo está el uso del acero.

La estructura de este trabajo se ha basado en el documento ACI 440.4R-04., 2004. *Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons*

Personalmente ha sido muy satisfactorio ampliar mi conocimiento en un campo tan apasionante como es el de los nuevos materiales de construcción y el poder consultar normativa, artículos y tesis de otros países y que en un futuro llegarán a nuestras universidades. También ha sido mi primer contacto con una disciplina como es la investigación a la que espero haber contribuido con la elaboración de este PFC

7 Bibliografía.

- (1) Abdelrahman, A. A.; Tadros, G.; and Rizkalla, S. H., 1995, "Test Model for the First Canadian Smart Highway Bridge," *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 4, July-Aug., pp. 451-458.
- (2) ACI 440.1R-03., 2003. *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*.
- (3) ACI 440.4R-04., 2004. *Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons*.
- (4) ACI 440R-07. Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. (solo la introducción). 2007
- (5) ACI 440R-96., 1996. *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*.
- (6) BENAVENT SERRA, J., 2012. *Diseño De Ensayo Para El Estudio De Propiedades Mecánicas De Barras FRP*. Universidad Politécnica de Valencia.
- (7) Braimah, A.; Green, M. F.; and Soudki, K. A., 1996, "Eliminating Steel from Bridge Deck Slabs by Combining CFRP Tendons with Polypropylene FRC," *Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS2)*, Montreal, Quebec, Canada, Aug., pp. 735-742.
- (8) Bryan, P. E., and Green, M. F., 1996, "Low Temperature Behavior of CFRP Prestressed Concrete Beams," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 23, No. 2, pp. 464-470.
- (9) Burgoyne, C. J., 1988, "Engineering Applications of Parafil Rope," *Symposium on Engineering Applications of Parafil Rope*, Imperial College, London, pp. 39-47.
- (10) Campbell, T. I.; Shrive, N. G.; Soudki, K. A.; Al-Mayah, A.; Keatley, J. P.; and Reda, M. M., 2000, "Design and Evaluation of a Wedge-Type Anchor for Fiber Reinforced Polymer Tendons," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 27, pp. 985-992.
- (11) CANADIAN Standards Association International (CSA. 2002). "Design and construction of building components with fibre reinforced polymers". CSA-S8-06, Toronto.
- (12) COUTO, I.A., 2007. *Análise Teórica E Experimental do Comportamento Da Aderência Entre O Concreto E Barras De Fibra De Vidro Impregnada Por Polímero*.
- (13) Dolan, C. W., 1989, "Prestressed Concrete Using KEVLAR Reinforced Tendons," PhD dissertation, Cornell University, Ithaca, N.Y., 204 pp.
- (14) Dolan, C. W., 1999, "FRP Prestressing in the USA," *Concrete International*, V.21, No. 10, Oct., pp. 21-24.

- (15) Dolan, C. W.; Hamilton, H. R.; Bakis, C. E.; and Nanni, A., 2000, "Design Recommendations for Concrete Structures Prestressed with FRP Tendons, Final Report," Department of Civil and Architectural Engineering Report DTFH61-96-C-00019, University of Wyoming, Laramie, Wyo., May, 113 pp.
- (16) Dolan, C. W.; Hamilton, H. R.; Bakis, C. E.; and Nanni, A., 2000, "Design Recommendations for Concrete Structures Prestressed with FRP Tendons, Final Report," Department of Civil and Architectural Engineering Report DTFH61-96-C-00019, University of Wyoming, Laramie, Wyo., May, 113 pp.
- (17) Domenico, N., 1995, "Bond Properties of CFCC Prestressing Strands in Pretensioned Concrete Beams," MSc thesis, Department of Civil Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, 160 pp.
- (18) Dye, W. K.; Bakis, C. E.; and Nanni, A., 1998, "Accelerated Testing of Carbon FRP Tendon-Anchor Systems for Post-Stressed Concrete Applications," Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction, V. 2, Sherbrooke, Quebec, Canada, pp. 463-473.
- (19) Ehsani, M. R.; Saadatmanesh, H.; and Nelson, C. T., 1997, "Transfer and Flexural Bond Performance of Aramid and Carbon FRP Tendons," PCI Journal, V. 42, No. 1, Jan.-Feb., pp. 76-86.
- (20) Fam, A. Z.; Rizkalla, S. H.; and Tadros, G., 1997, "Behavior of CFRP for Prestressing and Shear Reinforcements of Concrete Highway Bridges," ACI Structural Journal, V 94, No. 1, Jan.-Feb., pp. 77-86.
- (21) Fib bulletin 40, 2007. FRP Reinforcement in RC Structures. Technical Report.
- (22) Gerritse A., and Werner, J., 1988, ARAPREE: The Prestressing Element Composed of Resin Bonded Twaron Fibers, Holland Beton Group, The Netherlands, June, 8 pp.
- (23) Grace, N. F., 1999, "Continuous CFRP Prestressed Concrete Bridges," Concrete International, V. 21, No. 10, Oct., pp. 42-47.
- (24) Grace, N. F., 2000a, "Transfer Length of CFRP/CFCC Strands for Double-T Girders," PCI Journal, V. 45, No. 5, Sept.-Oct. 2000, pp. 110-126.
- (25) Grace, N. F., 2000b, "Response of Continuous CFRP Prestressed Concrete Bridges Under Static and Repeated Loadings," PCI Journal, V. 45, No. 6, Nov.-Dec., pp. 84-101.
- (26) Grace, N. F., and Abdel-Sayed, G., 1998b, "Behavior of Externally Draped CFRP Tendons in Prestressed Concrete Bridges," PCI Journal, V. 43, No. 5, Sept.-Oct., pp. 88-101.
- (27) HERNÁNDEZ-MONTES, E. and GIL-MARTÍN, L.M., 2007. Hormigón Armado Y Pretensado. Concreto Reforzado Y Preesforzado.

- (28) Holte, L. E.; Dolan, C. W.; and Schmidt, R. J., 1993, "Epoxy Socketed Anchors for Non-Metallic Prestressed Tendons," Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement of Concrete Structures, SP-138, A. Nanni and C. W. Dolan, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 381-400.
- (29) IBORRA, M., 2009. *Estudio Del Fenómeno De La Adherencia En El Hormigón Armado Con Barras Poliméricas*. Universidad Politécnica de Valencia ed., .
- (30) Iyer, S. L., 1993, "First Composite Cable Prestressed Bridge in the USA," Proceedings of the Thirty-Eight International SAMPE Symposium, Anaheim, Calif.
- (31) Iyer, S. L., and Sen, R., 1991, "Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures," Proceedings of Specialty Conference, ASCE, Las Vegas, Nev.
- (32) Iyer, S.; Lampo, R.; Hoy, D.; and McCarthy, N., 1996, "First Navy Pier Built in the USA Using FRP Cables for Prestressing," Proceedings of the International Conference on FRP in Civil Engineering at IIT Madras, Dec., pp. 490-498.
- (33) JSCE, 1992, "Application of Continuous Fiber Reinforcing Materials to Concrete Structures," Concrete Library International, No. 19, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, p. 89.
- (34) JSCE, 1996, "Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials: Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials," Concrete Library No. 88, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo, Japan, Sept.
- (35) JUAN, M.V., 2010. *Hormigón Armado Y Pretensado*. A. AGUADO DE CEA and A.R. MARÍ BERNAT eds., Barcelona: Barcelona : Edicions UPC.
- (36) JUAN, M.V., 2010. *Hormigón Armado Y Pretensado*. A. AGUADO DE CEA and A.R. MARÍ BERNAT eds., Barcelona: Barcelona : Edicions UPC.
- (37) Kim, P., and Meier, U., 1991, "CFRP Cables for Large Structures," Proceedings of the Specialty Conference on Advanced Composites Materials in Civil Engineering Structures, ASCE, Las Vegas, Nev., pp. 233-244.
- (38) L., and Mather, B., 1959, "Plastic-Glass Fiber Reinforcement for Reinforced Prestressed Concrete: Summary of Information from 1 July 1955 to 1 January 1959," Technical Memorandum No. 6-421 Report 2, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

- (39) Malvar, L. J., and Bish, J., 1995, "Grip Effects in Tensile Testing of FRP Bars," Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Ghent, Belgium, Aug., pp. 108-115.
- (40) Mather, B., and Tye, R. V., 1955, "Plastic-Glass Fiber Reinforcement for Reinforced and Prestressed Concrete: Summary of Information Available as of July 1, 1955," Technical Memorandum No. 6-421, Report 1, Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- (41) Matthys, S., and Taerwe, L., 2001, "FRP Reinforcement: Developments in Europe," Concrete International V. 25, No. 6, June, pp. 20-21.
- (42) Naaman, A. E., and Jeong, S. M., 1995, "Structural Ductility of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons," Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRPRCS-2), Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Ghent, Belgium, Aug., pp. 379-386.
- (43) Nanni, A., and Dolan, C. W., eds., 1993, Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement of Concrete Structures, SP-138, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 977 pp.
- (44) Nanni, A.; Bakis, C. E.; O'Neil, E. F.; and Dixon, T. O., 1996a, "Performance of FRP Tendon-Anchor Systems for Prestressed Concrete Structures," PCI Journal, V. 41, pp. 34-44.
- (45) Nanni, A.; Bakis, C. E.; O'Neil, E. F.; and Dixon, T. O., 1996a, "Performance of FRP Tendon-Anchor Systems for Prestressed Concrete Structures," PCI Journal, V. 41, pp. 34-44.
- (46) Nanni, A.; Bakis, C. E.; O'Neil, E. F.; and Dixon, T. O., 1996b, "Short-Term Sustained Loading of FRP Tendon-Anchor Systems," Construction and Building Materials, V. 10, pp. 255-266.
- (47) Nanni, A.; Bakis, C. E.; O'Neil, E. F.; and Dixon, T. O., 1996b, "Short-Term Sustained Loading of FRP Tendon-Anchor Systems," Construction and Building Materials, V. 10, pp. 255-266.
- (48) NBS, 1976, "Non-Metallic Antenna Support Materials Pultruded Rods for Antenna Guys, Catenaries and Communications Structures," Technical Report AFML-TR-76-42, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 126 pp.
- (49) PAWEŁ Bernard Potyrała (2011). "Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures". Universidad Politécnic de Catalunya. Junio 2011.

- (50) QUAYYUM, S., 2010. *Bond Behavior of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Rebars in Concrete*. University of British Columbia.
- (51) RAM, R. (2008) "Tipirneni Characterization of Thermal and Electrical Properties of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites" Tesis of Master Department of Industrial and Management Systems Engineering Morgantown, West Virginia. 2008
- (52) Reda Taha, M. M., and Shrive, N. C., 2003a, "New Concrete Anchors for Carbon Fiber-Reinforced Post-Tensioned Tendons—Part 1: State-of-the-Art Review/Design," *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 1, Jan.-Feb., pp. 86-95.
- (53) Reda Taha, M. M., and Shrive, N. C., 2003b, "New Concrete Anchors for Carbon Reinforced-Reinforced Post-Tensioned Tendons—Part 2: Development/Experimental Investigation," *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 1, Jan.-Feb., pp. 96-104.
- (54) Rizkalla, N. S.; Fang, Z.; and Campbell, T. I., 2001, "Partially Bonded Partially Prestressed Pretensioned Beams with Hybrid FRP/Stainless Steel Reinforcement," *Proceedings of the Fifth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, (FRPRCS-5)*, London, pp. 731-740.
- (55) Salib, S. R.; Abdel-Sayed, G.; and Grace, N. F., 1999, "Crack Formation in Fiber Reinforced Polymers Concrete Beams," *Fiber Reinforced Polymer Reinforcement of Reinforced Concrete Structures: Selected Presentation Proceedings*, C. W. Dolan, S. H. Rizkalla, and A. Nanni, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 219-231.
- (56) Santoh, N., 1993, "CFCC: Carbon Fiber Composite Cable," *Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications*, A. Nanni, ed., *Developments in Civil Engineering*, V. 42, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 223-248.
- (57) Sayed-Ahmed, E. Y., and Shrive, N. G., 1998, "A New Steel Anchorage System for Post-Tensioning Applications using Carbon Fiber Reinforced Plastic Tendons," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 25, No. 1, pp. 113-127.
- (58) SCHMIDT, J.W., et al, 2010. Mechanical Anchorage of FRP Tendons – A Literature Review. *Construction and Building Materials*, vol. 32, pp. 110-121 ISSN 0950-0618.
- (59) Sen, R.; Issa, M.; and Mariscal, D., 1992, "Feasibility of Fiberglass Pretensioned Piles in a Marine Environment," Final Report No. CEM/ST/92/1 submitted to Florida Department of Transportation.

- (60) Shaheen, E., 2004, "Carbon Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Anchorage System," PhD thesis, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada.
- (61) Soudki, K. A.; Green, M. F.; and Clapp, F. D., 1997, "Transfer Length of Carbon Fiber Rods in Precast Pretensioned Concrete Beams," *PCI Journal*, V. 42, No. 5, pp. 78-87.
- (62) Taerwe, L., and Matthys, S., 1999, "FRP for Concrete Construction: Activities in Europe," *Concrete International*, V. 21, No. 10, Oct., pp. 33-36.
- (63) TIBBETTS, Andrew J. (2008) "Durable Fiber Reinforced polymer connections for Precast Concrete Structures". Tesis of University of Wisconsin-Madison, 2008.
- (64) Triantafillou, T. C., and Deskovic, N., 1991, "Innovative Prestressing with FRP Sheets: Mechanics of Short Term Behavior," *Journal of Engineering Mechanics*, V. 117, No. 7, pp. 1652-1672.
- (65) Vijay, P. V., and GangaRao, H. V. S., 2001, "Bending Behavior and Deformability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members," *ACI Structural Journal*, V. 98, No. 6, Nov.-Dec., pp. 834-842.
- (66) Wines, J. C.; Dietz, R. J.; and Hawley, J. L., 1966, "Laboratory Investigation of Plastic-Glass Fiber Reinforcement for Reinforced and Prestressed Concrete," Report 1 & 2, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.
- (67) Zhang, B., 2002, "Experimental and Theoretical Investigations on New Bond-Type Anchorage System for Post-Tensioning Applications with FRP Tendons," PhD thesis, University of Sherbrooke, Canada.
- (68) Zoch, P.; Kimura, H.; Iwasaki, T.; and Heym, M., 1991, Carbon Fiber Composite Cables—A New Class of Prestressing Members, Transportation Research Board, Washington, D.C., 19 pp.