

---

# *ANÁLISIS DE TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS CON GFRP EN DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS*

---

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

AUTOR: PAZ GARCÍA-ESPAÑA SIMÓ

TUTOR: Dr. VÍCTOR CALVET RODRÍGUEZ

CURSO ACADÉMICO 2019-2020



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA



## RESUMEN

Durante estas últimas décadas, debido al considerable problema que presentan las estructuras de hormigón armado frente al efecto de la corrosión y el gran coste de las reparaciones por este motivo, se ha incrementado la demanda del uso de otros materiales para la armadura de los sistemas estructurales, por lo que se han realizado investigaciones sobre el uso de materiales innovadores que puedan sustituir a las barras de acero y que puedan cumplir con todas las necesidades que requieren estas estructuras durante su vida útil.

El presente Trabajo de Fin de Grado se fundamenta en el estudio de las diferentes técnicas de construcción de las estructuras mediante el uso de las barras de polímero reforzado con fibra de vidrio GFRP (Glass-Fiber Reinforced Polymer), un desarrollo importante en la tecnología del hormigón reforzado.

Para ello se van a analizar diferentes estructuras realizadas con este tipo de armado, y se realiza una comparación frente a la construcción tradicional mediante hormigón armado con redondos de acero corrugado. Al mismo tiempo, se analiza el distinto diseño en proyecto y en el proceso de ejecución que tiene implícito este tipo de solución constructiva con GFRP. Por último se analiza el coste de estas soluciones constructivas y se compara con las soluciones tradicionales.

Tras el análisis de los datos obtenidos en este trabajo, se obtiene que el uso de las barras de polímero reforzado con fibra de vidrio, es solución alternativa para el reemplazo de las barras de acero en las estructuras, ya que este tipo de barras pueden soportar mayores cargas, debido a que la resistencia a tracción es superior que las barras de acero, sumado a la ventaja de que es un material no corrosivo, por lo que las estructuras ya no tienen la necesidad de futuras reparaciones y garantizan una mayor durabilidad. Por todo esto, este material podría sustituir el uso del acero en los sistemas estructurales de hormigón armado e incluso optimizar el comportamiento de la estructura.

## PALABAS CLAVE

GFRP; FRP; Barras corrugadas de fibra de vidrio; Hormigón; Barras corrugadas de acero; Barras reforzadas con fibras.

## RESUM

Durant aquestes últimes dècades, a causa del considerable problema que presenten les estructures de formigó armat enfront de l'efecte de la corrosió i el gran cost de les reparacions per aquest motiu, s'ha incrementat la demanda de l'ús d'altres materials per a l'armadura dels sistemes estructurals, per la qual cosa s'han realitzat investigacions sobre l'ús de materials innovadors que puguin substituir a les barres d'acer i que puguin complir amb totes les necessitats que requereixen aquestes estructures durant la seua vida útil.

El present Treball de Fi de Grau es fonamenta en l'estudi de les diferents tècniques de construcció de les estructures mitjançant l'ús de les barres de polímer reforçat amb fibra de vidre \*GFRP (Glass-fiber Reinforced Polymer), un desenvolupament important en la tecnologia del formigó reforçat.

Per a això s'analitzaran diferents estructures realitzades amb aquesta mena d'armat, i es realitza una comparació enfront de la construcció tradicional mitjançant formigó armat amb redons d'acer corrugat. Al mateix temps, s'analitza el diferent disseny en projecte i en el procés d'execució que té implícit aquest tipus de solució constructiva amb \*GFRP. Finalment s'analitza el cost d'aquestes solucions constructives i es compara amb les solucions tradicionals.

Després de l'anàlisi de les dades obtingudes en aquest treball, s'obté que l'ús de les barres de polímer reforçat amb fibra de vidre, és solució alternativa per al reemplaçament de les barres d'acer en les estructures, ja que aquest tipus de barres poden suportar majors càrregues, pel fet que la resistència a tracció és superior que les barres d'acer, sumat a l'avantatge que és un material no corrosiu, per la qual cosa les estructures ja no tenen la necessitat de futures reparacions i garanteixen una major durabilitat. Per tot això, aquest material podria substituir l'ús de l'acer en els sistemes estructurals de formigó armat i fins i tot optimitzar el comportament de l'estructura.

## PARAULES CLAU

GFRP; FRP; Barres corrugades de fibra de vidre; Formigó; Barres corrugades d'acer; Barres reforçades amb fibres.

## **ABSTRACT**

During these last decades, due to the considerable problem presented by reinforced concrete structures against the effect of corrosion and the great cost of repairs for this reason, the demand for the use of other materials for the reinforcement of structural systems has increased. Therefore, research has been carried out on the use of innovative materials that can replace steel bars and that can meet all the needs required by these structures during their useful life.

This End of Degree Project is based on the study of the different construction techniques of the structures through the use of GFRP (Glass-Fiber Reinforced Polymer) bars, an important development in reinforced concrete technology.

To do this, different structures made with this type of reinforcement will be analyzed, and a comparison will be made with traditional construction using reinforced concrete with corrugated steel rounds. At the same time, the different design in the project and in the execution process implied by this type of construction solution with GFRP is analyzed. Finally, the cost of these construction solutions is analyzed and compared with traditional solutions.

After the analysis of the data obtained in this work, it is obtained that the use of the glass fiber reinforced polymer bars is an alternative solution for the replacement of the steel bars in the structures, since this type of bars can support higher loads, due to the fact that the tensile strength is higher than the steel bars, added to the advantage that it is a non corrosive material, so the structures no longer have the need of future repairs and guarantee a higher durability. For all this, this material could replace the use of steel in reinforced concrete structural systems and even optimize the behaviour of the structure.

## **KEY WORDS**

GFRP; FRP; Corrugated fiberglass bars; Concrete; Corrugated Steel bars; Fiber-reinforced bars.

# INDICE

RESUMEN .....	3
RESUM.....	4
ABSTRACT .....	5
INDICE .....	6
INDICE DE TABLAS.....	8
INDICE DE FIGURAS.....	9
<b>1. Introducción.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1. Antecedentes.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. Objetivos.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. Metodología .....</b>	<b>14</b>
<b>2. Revisión bibliográfica .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1. Composición de las barras de GFRP .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.1. Matriz polimérica .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2. Refuerzo de la fibra de vidrio .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.3. Proceso de fabricación.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2. Tipos de barras de GFRP .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.1. Módulo elástico y grados de resistencia .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2. Geometría superficial .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3. Propiedades físicas, mecánicas y durabilidad .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.1. Propiedades físicas .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.1.1.Densidad .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.1.2.Coeficiente de expansión térmica.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.1.3.Conductividad eléctrica.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2. Propiedades mecánicas.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2.1.Tracción .....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.2.2.Compresión .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.3. Durabilidad .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3.1.Efecto del agua .....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.3.2.Efecto de los cloruros.....</b>	<b>33</b>

2.3.3.3.Efecto de los álcalis.....	33
2.3.3.4.Efecto de la radiación ultravioleta .....	35
2.3.3.5.Efecto de la temperatura .....	36
2.3.3.6.Efecto de la carbonatación del hormigón.....	39
3. Diseño y proceso de ejecución de las estructuras con armado de GFRP .....	41
3.1. Análisis en el proceso de diseño .....	41
3.1.1. Adherencia.....	43
3.1.2. Bases de cálculo.....	45
3.1.3. Tensiones normales .....	46
3.1.4. Tensiones tangenciales .....	47
3.1.5. Fisuración.....	48
3.1.6. Deformaciones .....	49
3.2. Análisis en el proceso de ejecución .....	49
3.2.1. Manipulación y almacenamiento .....	49
3.2.2. Colocación y ensamblaje de materiales .....	50
4. Análisis de estructuras con armado de GFRP .....	53
4.1. Estudio de caso 1: Diseño y construcción de tanque de tratamiento de agua .....	53
4.2. Estudio de caso 2: Diseño y construcción de losas del aparcamiento de La Chancelière .....	56
4.3. Estudio de caso 3: Diseño y construcción del puente de Sainte-Catherine.....	58
5. Análisis económico de las estructuras de GFRP .....	61
6. Conclusiones .....	64
BIBLIOGRAFÍA .....	66
BIBLIOGRAFÍA TABLAS.....	69
BIBLIOGRAFÍA FIGURAS.....	71

## INDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas y físicas de las resinas termoestables.

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas y físicas de la fibra de vidrio comercial.

**Tabla 3.** Valores límite de módulo elástico y resistencia a tracción. Adaptación *JSCE 1997*

**Tabla 4.** Densidades de barras de FRP. Adaptación FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007

**Tabla 5.** Coeficiente de expansión térmica, transversal y longitudinal en barras de FRP.

**Tabla 6.** Propiedades mecánicas de los redondos de acero y de FRP.

**Tabla 7.** Ensayos reducción resistencia a tracción en barras de GFRP por efecto de los álcalis.

**Tabla 8.** Efecto de la temperatura en barras de GFRP expuestas a álcalis, hormigón y agua.

**Tabla 9.** Coeficiente minoración del hormigón según EHE-08.

**Tabla 10.** Coeficiente minoración  $C_g$  del FRP según ACI 440.1R-15.

**Tabla 11.** Límite del ancho de fisura para los elementos de hormigón armado con FRP.

**Tabla 12.** Precio de venta de barras corrugadas según diámetro (€/m).

**Tabla 13.** Comparación de las propiedades de las barras de GFRP, acero y acero inoxidable.



## INDICE DE FIGURAS

**Fig. 1.** Tipos de redondos de FRP.

**Fig. 2.** Barras de GFRP.

**Fig. 3.** Cadena molecular a) polímero termoplástico; b) polímero termoestable.

**Fig. 4.** Tipos de configuración de refuerzos con GFRP.

**Fig. 5.** Proceso de pultrusión.

**Fig. 6.** Modelos de geometría superficial de barras de GFRP.

**Fig. 7.** Direcciones de las barras de GFRP. 1(L) dirección longitudinal; 2(L) y 3(L) direcciones transversales.

**Fig. 8.** Comportamiento tensión/alargamiento barras de acero y de FRP.

**Fig. 9.** Rotura de los redondos FRP dependiendo de la dirección de tensión.

**Fig. 10.** Resistencia a compresión según el diámetro de las barras de fibra de vidrio.

**Fig. 11.** Variación de la  $T_g$  según la rigidez del polímero y el grado de humedad.

**Fig. 12.** Comportamiento mecánico en barras de GFRP, CFRP y acero frente a diferentes temperaturas.

**Fig. 13.** Proceso de diseño sobre el sistema estructural. Adaptación de McCormac, J. C., & Nelson, J. K. (2006)

**Fig. 14.** Comportamiento adherente de las barras de acero y FRP.

**Fig. 15.** Fisura producida en probeta cilíndrica de hormigón reforzado con GFRP.

**Fig. 16.** Separadores con propiedades no corrosivas ni magnéticas.

**Fig. 17.** Atado de armado de GFRP mediante bridas de plástico.

**Fig. 18.** Volumetría del conjunto. Planta de tratamiento de agua.

**Fig. 19.** Detalles del refuerzo de barras de GFRP para la sección vertical del tanque.

**Fig. 20.** Refuerzo de los cimientos mediante barras de GFRP.

**Fig. 21.** Encofrado de los refuerzos verticales de barras de GFRP

**Fig. 22.** Hormigonado de la losa general de cubierta.

**Fig. 23.** Edificio residencial sobre el aparcamiento de La Chancelière

**Fig. 24.** Detalle de la corrosión de la armadura de acero.

**Fig. 25.** Demolición de la losa antigua para colocación de nuevo armado.

**Fig. 26.** Colocación del armado de refuerzo de GFRP.

**Fig. 27.** Anclaje de las barras de GFRP en elementos estructurales.

**Fig. 28.** Planta puentes gemelos de Sainte-Catherine.

**Fig. 29.** Armado híbrido losas. Acero galvanizado en la cara inferior y GFRP en la superior.

**Fig. 30.** Armado de refuerzo híbrido con barras de GFRP y acero galvanizado.

**Fig. 31.** Hormigonado de la losa híbrida del puente de Sainte-Catherine.



## 1. INTRODUCCIÓN

---

## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

Uno de los materiales más utilizados en la construcción y diseño de estructuras es el hormigón armado con barras de acero corrugadas. Sin embargo, el acero al estar expuesto a entornos agresivos, puede presentar una serie de problemas como corroerse, se reduce su resistencia a altas temperaturas, su elevado coste de mantenimiento en el largo plazo, su disminución de durabilidad, etc.

Gracias a los avances tecnológicos dentro de los materiales de construcción se han podido obtener grandes mejoras en: economía, seguridad y funcionalidad de estos sistemas constructivos con el fin de mejorar las necesidades de la población, incrementando la calidad de vida de la sociedad.

En los últimos años, y con motivo del coste de mantenimiento de las estructuras de hormigón armado con barras de acero corrugadas debido al problema de la corrosión, se han realizado investigaciones sobre el uso de materiales nuevos, que puedan sustituir a los redondos de acero. Dentro de estos nuevos materiales que sustituyen al armado tradicional del hormigón destacamos uno de estos que ha estado presente desde finales de 1940: el polímero reforzado con fibras (FRP).

El compuesto de polímero reforzado con fibra presenta una serie de ventajas en el ámbito de la construcción, como son, no verse afectados por el efecto de la corrosión, una elevada resistencia de tracción y rigidez con respecto a su peso, unas condiciones de amortiguación y neutralidad electromagnética mayor a la de otros materiales y una expansión térmica controlable. Todas estas propiedades aportan además una mayor seguridad y duración respecto a su vida útil, además del ahorro en mantenimiento y en costes de elaboración de los compuestos. (Almerich Chulia, Ana I. 2010)

Dentro de la normativa de diseño de sistemas estructurales de hormigón armado con FRP (ACI 440.1R-15, JSCE 1997), los polímeros reforzados con fibra como armado del hormigón más utilizados en la construcción de estructuras son (Fig.1.); Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio (GFRP); Polímero Reforzado con Fibra de Aramida (AFRP) y Polímero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP). Su desarrollo como barras de FRP apareció en los 70 como resolución al problema de corrosión.



**Fig. 1.** Tipos de redondos de FRP.

Pese a las numerosas ventajas que presenta la armadura de FRP, el coste de fabricación de estas barras es alto en la actualidad, por lo que su uso queda limitado a ciertas aplicaciones cuando se requiera cumplir unas necesidades en concreto. Un mayor uso en la edificación conllevaría la reducción de coste en la producción, lo que favorecería el uso habitual de los armados de FRP.

## **1.2. Objetivos**

El presente trabajo final de grado tiene por objetivo el análisis de las diferentes técnicas de construcción de edificios mediante el uso de los redondos de polímeros reforzados con fibras de vidrio GFRP (Glass-Fiber Reinforced Polymer).

Para esto se ha realizado el análisis del diseño en proyecto, así como el proceso de ejecución que tiene implícito este tipo de solución constructiva. Por último, se analiza su coste y se comparará con las soluciones tradicionales mediante hormigón armado con redondos de acero corrugado, con el objetivo de obtener que solución es la más óptima acorde a la relación entre su coste y propiedades.

## **1.3. Metodología**

En la elaboración de este trabajo de fin de grado, inicialmente se estudia la composición de las barras de polímero reforzadas con fibra de vidrio y los tipos de barras existentes, también se estudian sus propiedades físicas, mecánicas y su durabilidad.

A continuación, para cumplir con los objetivos de este TFG se realiza el análisis en diseño y proceso de ejecución de las estructuras con armado de GFRP, así como estudio de tres casos de estructuras realizadas mediante este sistema constructivo.

Por último, se realizará un análisis económico de las estructuras con barras de polímero reforzadas con fibra de vidrio y se realizará una comparativa de este sistema constructivo con la estructura tradicional de hormigón armado con barras de acero corrugadas, con el fin de obtener las diferentes ventajas y desventajas del sistema utilizado.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1. Composición de las barras de GFRP

En el presente punto, se definen los diferentes componentes de las barras de polímero reforzadas con fibra de vidrio, así como los diferentes tipos que forman los componentes. Las barras de GFRP (Fig. 2) están formadas por dos o más constituyentes de diferente composición y diferentes propiedades, por una parte, encontramos los dos constituyentes básicos: la matriz polimérica (compuesto mayoritario) y el refuerzo (compuesto minoritario), dentro de la composición de las barras de GFRP también encontramos un tercer constituyente formado por la interacción de los componentes básicos, la interfaz entre matriz-refuerzo.



**Fig. 2.** Barras de GFRP.

#### 2.1.1. Matriz polimérica

Los matriz polimérica es un compuesto orgánico que está compuesto esencialmente por hidrógeno y carbono. Dichos compuestos se obtienen a través del medio ambiente o bien, en laboratorios mediante un conjunto de moléculas de naturaleza orgánica. El polímero, es una molécula de cadena larga que tiene una o más unidades repetidas de moléculas unidas entre sí y proporcionando unas propiedades que no varían. (Calvet Rodríguez, V. 2014).

Las principales funciones de estas matrices poliméricas son:

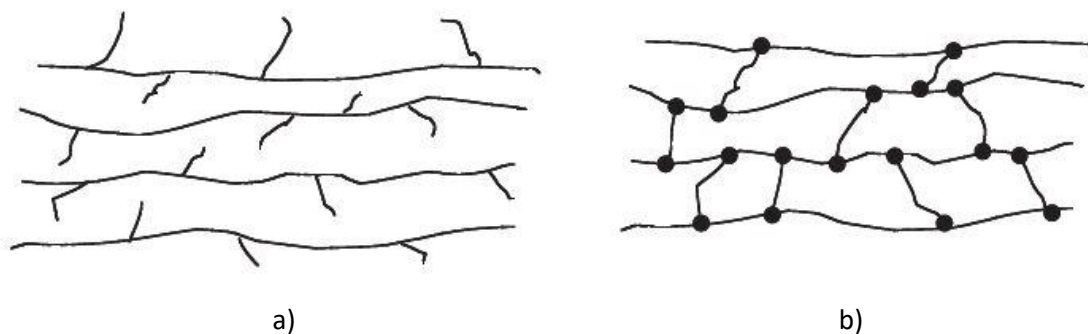
- Transmitir y distribuir la tensión de la matriz a las fibras de vidrio.
- Mantener la unión de estas fibras (refuerzo) entre sí, pero a su vez mantenerlas también separadas para evitar la propagación de las grietas en caso de ser producidas en el traslado o manipulación de las barras.



- Mantener y proteger las fibras, garantizando que las fibras se mantengan en el lugar y dirección deseada.
- Proteger las fibras de las condiciones ambientales, los agentes exteriores, las posibles manipulaciones y durante su transporte.

El polímero puede encontrarse en estado líquido o sólido, y los polímeros curados se denominan matrices poliméricas. La matriz polimérica puede clasificarse en dos tipos dependiendo de la reacción que se produzca ante el calentamiento y enfriamiento: los polímeros termoplásticos y los termoestables. Los polímeros termoestables se encuentran en estado solidificado y los polímeros termoplásticos se encuentran en estado líquido. (GangaRao et al. 2007).

Ambos tipos de matrices poliméricas están formados por largas cadenas moleculares, sin embargo, estos se comportan de forma diferente durante el proceso de curación, debido a la disposición de las moléculas dentro de la cadena. En la figura 3 se muestra esquemáticamente la cadena molecular del polímero termoplástico y el polímero termoestable. La diferencia entre estos dos polímeros es la presencia o ausencia de las uniones entre las cadenas moleculares. En los polímeros termoplásticos las moléculas tienen forma lineal, sin enlaces químicos (Fig. 3.a), mientras que en los polímeros termoestables las moléculas están químicamente reticuladas o entrecruzadas, aportando una estructura rígida (Fig. 3.b).



**Fig. 3.** Cadena molecular a) polímero termoplástico; b) polímero termoestable.

El tipo de resina polimérica más utilizada para la barra de GFRP es el polímero termoestable, dentro de esta, las resinas más comunes son: la resina epoxi, la más utilizada, las resinas de viniléster y las resinas de poliéster, las dos últimas son utilizadas en menor medida. En la tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas y las propiedades físicas de los tipos de resinas poliméricas.

	Epoxi	Poliéster	Viniléster
Resistencia a tracción, MPa	55 - 130	20 - 100	70 - 80
Resistencia a compresión MPa	103 - 172	89 - 206	121 - 201
Módulo de elasticidad, GPa	2,5 - 4,1	2,6 - 4,1	3,0 - 3,5
Deformación de ruptura %	1 - 9	1 - 9	3,5 - 5,5
Coefficiente de Poisson	0,2 - 0,33	--	--
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,1 - 1,3	1,0 - 1,45	1,1 - 1,3
Tg (°C)	50 - 260	100 - 140	90 - 140
CTE longitudinal (10 <sup>-6</sup> /°C)	45 - 90	55 - 100	21 - 73
Contracción de curado (%)	1 - 5	5 - 12	5.4 - 10.3

**Tabla 1.** Propiedades mecánicas y físicas de las resinas termoestables.

Las resinas de tipo epoxi presentan unas propiedades que pueden variar según el tipo de endurecedor que se utiliza en el tiempo de curado. Este tipo de resina tiene unas ventajas como: una alta resistencia, poca pérdida de volumen, resistencia a un ataque químico, gran adherencia a las fibras y buenas propiedades eléctricas. Sin embargo, también presenta algunos inconvenientes, ya que son de presupuesto más elevado y el tiempo de curado es alto.

Las resinas de tipo poliéster presentan unas propiedades que dependen de la densidad de los enlaces dentro de la cadena molecular. Este tipo de resinas presentan una serie de ventajas como son: un uso más sencillo, son más económicas, tienen una viscosidad baja, buena resistencia química y un rápido proceso de curado. Dichas resinas presentan propiedades mecánicas inferiores a la epoxi, mala resistencia a fatiga y una pérdida de volumen durante el curado

Las resinas de tipo viniléster es de tipo insaturada, esta está formada por una reacción entre ácidos metacrilatos o acrílicos y la resina epoxi. Este tipo de resina se adapta a las necesidades de fabricación de las barras de GFRP, ya que presenta una baja viscosidad y un corto tiempo de curado, pero como desventajas, este tipo de resinas presentan una gran pérdida de volumen durante el proceso de curado, son más caras que las resinas de poliéster y necesitan un post curado para alcanzar las propiedades mecánicas que se requieren.

### 2.1.2. Refuerzo de la fibra de vidrio

Las fibras de vidrio son las más utilizadas para producir los compuestos de FRP, ya que son las más económicas y su producción es la más sencilla. Las fibras de vidrio están hechas de vidrio fundido hilado con platino y rodio calentados eléctricamente, más tarde estos filamentos se enfrían desde una temperatura de 2300°F hasta la temperatura ambiente en unos 10-5 segundos (GangaRao et al. 2007). A las fibras de vidrio se les aplica una capa protectora encolada que realiza diferentes funciones como: reducir el efecto abrasivo y la fricción estática entre los

filamentos, reducir el daño de las fibras durante su manipulación y facilitar el proceso de moldeo.

Existen distintos tipos de fibras de vidrio disponibles en el mercado de la construcción con diferentes propiedades físicas y mecánicas (tabla 2):

- Vidrio-E (eléctrica): es la más económica de todas las fibras, se utiliza cuando se requieren aplicaciones de fuerza, resistencia eléctrica y ataques frente a ácidos.
- Vidrio-S o –R (Strong – Reinforced): tienen unas propiedades con mayores resistencias, rigidez y menor deformación que las fibras de tipo E, pero su coste es mayor.
- Vidrio-AR: son aquellas que son resistentes a los álcalis, se desarrollan con el fin de reducir la pérdida de sección en ambientes alcalinos.
- Vidrio-C: se utilizan debido a su estabilidad química en entorno ácidos, tiene una gran resistencia frente a los agentes químicos.
- Vidrio-D: se produce para reducir la pérdida dieléctrica.

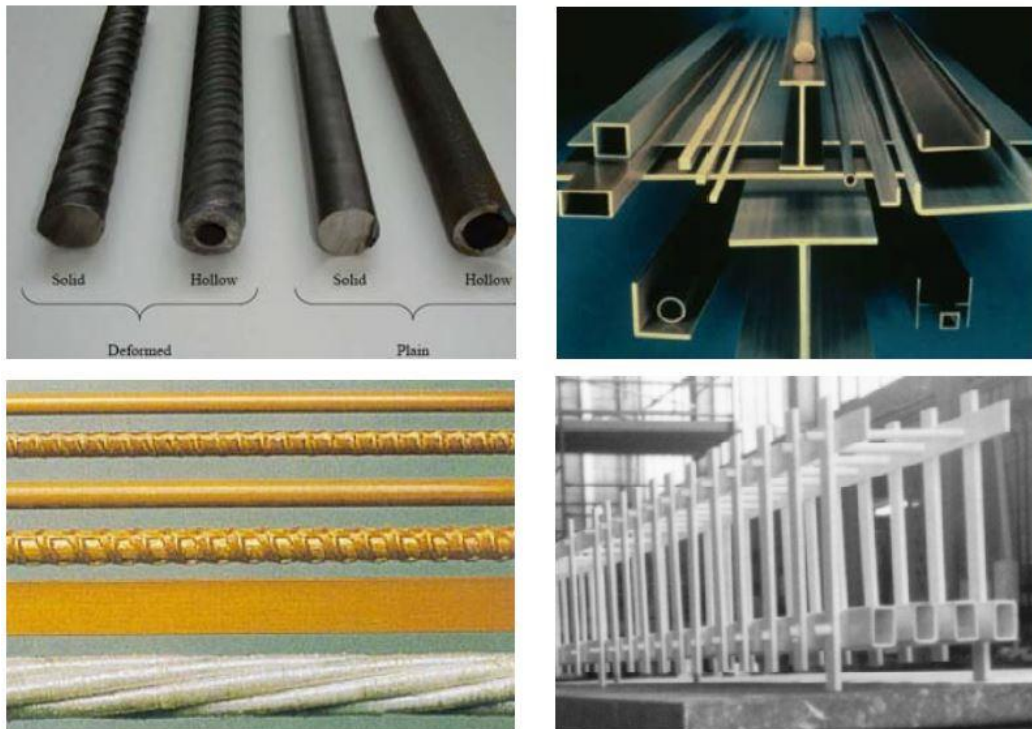
	E - Glass	S - Glass	C - Glass	AR - Glass
Módulo de elasticidad, GPa	72,4	86,9	69,0	70,0
Resistencia a tracción, MPa	3400	4300	3100	2500
Coefficiente de Poisson	0,2	0,22	--	--
Deformación de ruptura %	4,8	5,0	4,8	3,6
Diámetro ( $\mu$ m)	10,0	10,0	4,5	--
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,49	2,49	2,78
Contracción de curado (%)	6,3	5,1	--	--
CTE longitudinal (10 <sup>-6</sup> /°C)	5,0	2,9	7,2	--

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas y físicas de la fibra de vidrio comercial.

La fibra de vidrio ofrece muchas ventajas, tales como: (GangaRao et al. 2007) una elevada resistencia a tracción y resistencia química, excelentes propiedades aislantes, un coste reducido, posee muy bajo peso, soporta altas temperaturas y no es combustible, sin embargo, estas fibras también tienen unas desventajas tales como: resistencia a fatiga baja, dureza alta, sensibilidad a la abrasión por causa de una manipulación de las fibras y un módulo de baja tensión.

Uno de los beneficios de los refuerzos mediante GFRP, es la aptitud que tiene para configurar el refuerzo para obtener unos resultados concretos y cumplir con las necesidades que respondan a cualquier tipo de diseño estructural, con el fin de obtener los objetivos propuestos para la adecuada construcción de las estructuras.

El refuerzo se puede disponer de diferentes tipos (Fig.4) barras, cordones, placas o resaltes a base de hilos. Dentro de estos tipos, el acabado superficial del elemento puede ser modificado con el fin de aumentar o disminuir la adherencia del GFRP con el hormigón. (Almerich Chulia, Ana I. 2010).



**Fig. 4.** Tipos de configuración de refuerzos con GFRP.

### 2.1.3. Proceso de fabricación.

En la actualidad las barras de GFRP se producen generalmente mediante el método de pultrusión (Fig. 5.) también se pueden emplear unas variantes: el pull-forming y pull-winding. Este tipo de fabricación nos permite conseguir una alta capacidad de fibras, entre el 60% y el 80% y la homogénea distribución de las fibras.

El proceso de pultrusión consiste en estirar de forma continua, las fibras de vidrio que en su inicio están envueltas en bobinas, por medio de unas guías, a continuación, las fibras se sumergen en un baño de resina polimérica, y una vez impregnadas las fibras con resina, atraviesan un molde cerrado y de altas temperaturas para la compactación y endurecimiento del material. En la salida del molde se obtiene una pieza termoestable, con las propiedades físicas y mecánicas previamente determinadas, finalmente, como se trata de un continuo proceso de laminado, este termina cortando el perfil a la longitud diseñada.

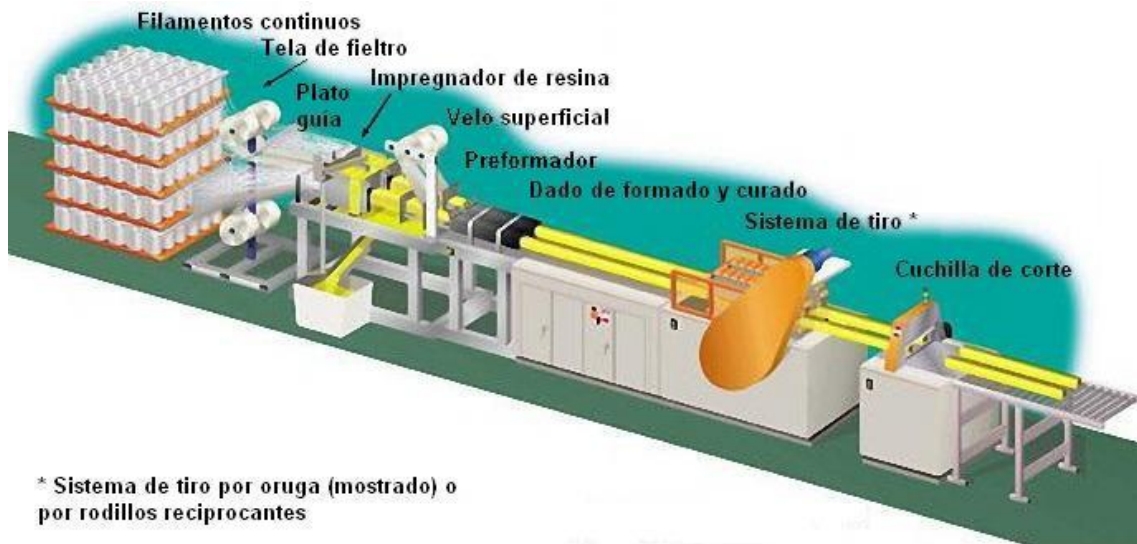


Fig. 5. Proceso de pultrusión.

Después de finalizar el proceso de pultrusión y con el objetivo de incrementar la adherencia entre las barras de GFRP y el hormigón, se pueden realizar diferentes tratamientos superficiales antes de su endurecimiento completo, como son: la aplicación de salientes, como cordones cruzando el eje longitudinal del redondo; la aplicación de una envoltura de cabos de fibras envueltas en torno al largo de la barra; la aplicación de una envoltura por medio de un tejido, creando una impresión complementaria; la adherencia por medio de una delegada capa de resina polimérica con un acabado superficial de grano fino de arena.

## 2.2. Tipos de barras de GFRP

Los redondos de GFRP, a diferencia de los de acero, no están estandarizados, estas barras no tienen grados de resistencia, diámetro de barra, un módulo de elasticidad, y geometría superficial determinadas. Las características y propiedades dependen del proceso de fabricación y la composición de las barras de GFRP. Por consiguiente, los valores de las propiedades mecánicas de las barras de GFRP (módulo elástico, grado de resistencia y alargamiento de rotura) vendrán dados por el fabricante, adaptándose a las normativas aplicables en cada país.

### 2.2.1. Módulo elástico y grados de resistencia

Las barras comercialmente disponibles de GFRP, tienen una elevada variedad de módulos elásticos y grados de resistencia a tracción que vienen dados dependiendo de la composición de las barras y del procedimiento de fabricación, por lo que dependen de cada fabricante.

En la normativa ACI-440.1R-15 se implantan unos valores mínimos de módulo elástico y resistencia que las barras de FRP deben cumplir. Los armados de refuerzo se encuentran disponibles en diferentes grados de resistencia, que se basan en la resistencia a tracción de la barra, siendo el grado más bajo de 414 MPa (grado F60) y el grado más elevado de 2069 MPa (grado F290). Los grados que presenta la normativa anteriormente mencionada (Siendo  $f_{fu}$  la resistencia que debe garantizar los redondos de GFRP a tracción) son:

- Grado F 60: corresponde a  $414,0 \text{ MPa} \leq f_{fu}^* < 483,0 \text{ MPa}$ ;
- Grado F 70: corresponde a  $483,0 \text{ MPa} \leq f_{fu}^* < 552,0 \text{ MPa}$ ;
- Grado F 290: corresponde a  $1999 \text{ MPa} \leq f_{fu}^* < 2069 \text{ MPa}$ .

Las barras de GFRP presentan comportamientos linealmente elásticos hasta el punto de rotura. El módulo de elasticidad de este tipo de barras es inferior al de las de acero, más o menos en torno a un 20%, y debe ser similar al grado de resistencia de las barras, el módulo varía en un rango de valores entre el 35-51 GPa (A. Hadhood et al. 2017), por otra parte el módulo de compresión que presentan es inferior al módulo de tracción, entorno a un 83% y un 89%.

Por una parte, el módulo mínimo que exige la norma ACI-440.1R-15 para las barras de GFRP es de un grado de módulo de E5,7 lo que indica que el módulo de la barra debe ser de al menos de 39,3 GPa.

Mientras que la normativa CNR-DT 203 / 2006, implanta la resistencia característica mínima a tracción que deben tener todos los tipos de barras de FRP incluidas las de GFRP, esta no debe ser inferior a 400,0 MPa, y para el módulo elástico, el valor medio no debería ser inferior a 35,0GPa para las barras de GFRP.

La norma JSCE de 1997 también implanta unos valores mínimos de módulo elástico y resistencia a tracción (tabla 3.), dependiendo del acabado de geometría superficial de los redondos de

GFRP, donde aparecen las barras de tipo GR (barra lisa de GFRP con tratamientos superficiales) y las barras de tipo GD (barra de GFRP deformada), el volumen de la fibra se encuentra entre un 65% y 68%.

	Volumen fibras (%)	$f_{tu}$ (MPa)	Módulo elástico (Gpa)
GR65, GD65	65 - 68	1130	37 - 49

**Tabla 3.** Valores límite de módulo elástico y resistencia a tracción. Adaptación *JSCE 1997*

### 2.2.2. Geometría superficial

Todavía no existe una geometría y acabado superficial estandarizados para los redondos de GFRP, por lo que se puede encontrar en el mercado una gran variedad de acabados superficiales (Fig. 6.) en las barras de GFRP (generalmente, acabados revestidos de granos de arena o sílice, resaltes exteriores) dependiendo de los distintos procesos en la fabricación.

En la barra de GFRP se puede modificar la geometría superficial con el objetivo de incrementar o disminuir la adherencia entre barra de GFRP y el hormigón. Debido a la existencia de diferentes acabados superficiales, la propiedad de adherencia es variable.

Siempre se ha intentado que la tensión adherente sea semejante a la de las barras corrugadas de acero, sin embargo, algunos casos presentan una menos tensión adherente (Cosenza et al. 1997). La resistencia de las barras de GFRP es independiente a la tensión de adherencia, siendo la adherencia distinta según el tipo de geometría superficial empleada, por lo que la cuestión clave era crear una superficie adecuada en la capa de resina del exterior de la barra capaz de transferir las fuerzas del hormigón y movilizar las fibras longitudinales en el interior de la barra.



**Fig. 6.** Modelos de geometría superficial de barras de GFRP.

### 2.3. Propiedades físicas, mecánicas y durabilidad

En este punto se exponen las propiedades físicas, mecánicas y las características de durabilidad de los redondos de GFRP. Estas características son diferentes en cada producto, ya que factores como el control de calidad mientras se realiza el proceso de fabricación, la orientación de la fibra, la matriz polimérica empleada, etc., cumplen un importante papel en las características de las barras.

Puesto que las barras de GFRP están formadas por una matriz polimérica reforzada mediante fibras longitudinales de vidrio presentan la característica de anisotropía (esta característica de las barras de GFRP es causa del predominio del refuerzo de vidrio en el eje longitudinal, mientras que la matriz polimérica predomina en el eje transversal), la cual afecta al comportamiento y a las propiedades, proporcionando a las barras de GFRP propiedades mecánicas y físicas diferentes en cada eje principal de las estas (Calvet Rodríguez, V. 2014).

#### 2.3.1. Propiedades físicas

##### 2.3.1.1. Densidad

La densidad se define como la propiedad que relaciona la masa y el volumen. Las densidades de estas barras de GFRP se calculan a partir de la densidad de los compuestos que la constituyen se debe conocer la densidad y el volumen de la matriz polimérica y las fibras que constituyen las barras de GFRP, cuya ecuación es “ $\rho_c$ ” (Ec. 1.).

$$\rho_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (\text{Ec. 1.})$$

Donde “ $\rho_c$ ” es la densidad de las barras de GFRP, “ $V_f$ ” y “ $\rho_f$ ” son el volumen y la densidad de las fibras de vidrio y “ $V_m$ ” y “ $\rho_m$ ” son el volumen y la densidad de la matriz polimérica.

En la tabla 4 se puede observar, que la densidad de este tipo de materiales es bastante inferior a la densidad del acero, esta característica hace que este tipo de barras sean más manipulables en la construcción además de contribuir a que el transporte sea más económico. (FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007).



Matriz / FRP	CFRP (g/ cm <sup>3</sup> )	ARFP (g/ cm <sup>3</sup> )	GFRP (g/ cm <sup>3</sup> )	Acero (g/ cm <sup>3</sup> )
Poliéster	1430-1650	1310-1430	1750-2170	
Epoxy	1440-1670	1320-1450	1760-2180	7850
Viniléster	1440-1630	1300-1410	1730-2150	

**Tabla 4.** Densidades de barras de FRP. Adaptación FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007

Observando la tabla 4 se concluye que el valor de la densidad de la barra de fibra de vidrio es 1/4 a la densidad del acero, la de carbono es 1/5 respecto a la del acero y la de fibra de Aramida 1/6 de la densidad del acero.

### 2.3.1.2. Coeficiente de expansión térmica

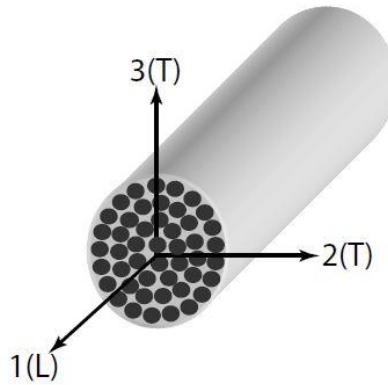
Las barras de FRP poseen un coeficiente de expansión térmica que depende de los tipos de fibra, la matriz polimérica y el volumen de los constituyentes. Las fibras de vidrio y la matriz polimérica pueden considerarse materiales isotrópicos, mientras que las de carbono y las de Aramida son materiales anisótropos.

El coeficiente longitudinal de expansión térmica varía dependiendo de las características de la fibra de vidrio, en cambio el coef. de expansión transversal varía según la matriz polimérica. En la tabla 5 podemos ver los valores típicos del coeficiente de expansión térmica en la dirección transversal y longitudinal de los tipos de barras de FRP, con un volumen de fibras entre el 50,0% - 70,0%.

Barra / FRP	$\alpha_{\text{Longitudinal}} [10^{-6} / ^\circ\text{C}]$	$\alpha_{\text{Transversal}} [10^{-6} / ^\circ\text{C}]$
CFRP	9,0 - 0,0	74,0 - 104,0
AFRP	-6,0 - -2,0	60,0 - 80,0
GFRP	6,0 - 10,0	21,0 - 23,0
Acero	11,7	11,7

**Tabla 5.** Coeficiente de expansión térmica, transversal y longitudinal en barras de FRP.

A causa de la característica de anisotropía de los redondos de GFRP, el CTE (coeficiente de expansión térmica) en el sentido transversal ( $\alpha_T$ ) está dominado principalmente por la matriz polimérica, mientras que en el eje longitudinal ( $\alpha_L$ ) está determinado por las propiedades de las fibras de vidrio. En la figura 7 se indican las principales direcciones de una barra de GFRP.



**Fig. 7.** Direcciones de las barras de GFRP.  
1(L) dirección longitudinal; 2(L) y 3(L) direcciones transversales.

Para el caso de los materiales isotrópicos como es la fibra de la fibra de vidrio se han determinado las siguientes ecuaciones para la obtención del coeficiente de expansión térmica. (Schapery, 1968).

$$\alpha_L = \frac{E_{fL} \cdot V_f \cdot \alpha_{fL} + E_m \cdot V_m \cdot \alpha_m}{E_{fL} \cdot V_f + E_m \cdot V_m} \quad (\text{Ec. 2.})$$

$$\alpha_T = (1 + V_m) \cdot V_m \cdot \alpha_m + (1 + v_f) \cdot V_f \cdot \alpha_f - \alpha_L \cdot v_{LT}$$

Donde el “ $\alpha_f$ ” es el CTE de la fibra de vidrio, “ $E_m$ ” es el módulo de Young de la matriz y “ $E_f$ ” es de las fibras, “ $\alpha_m$ ” es el CTE de la matriz polimérica y “ $v_{LT}$ ” el coef. de Poisson del compuesto, el cual se obtiene mediante la Ec. 4.

$$v_{LT} = v_f \cdot V_f + v_m \cdot V_m \quad (\text{Ec. 4.})$$

Donde “ $v_m$ ” es el coef. de Poisson de la matriz y “ $v_f$ ” de la fibra.

### **2.3.1.3. Conductividad eléctrica**

Los redondos de acero tienen una elevada conductividad eléctrica, tanto en la dirección transversal de la barra como en la longitudinal, por lo que hay que someterlo a tratamientos superficiales que contrarresten esta conductividad eléctrica o bien revestirlo con materiales que lo protejan. Por el contrario, en la barra de FRP, esta característica depende del tipo de fibra que se emplee.

Las barras de GFRP tienen excelentes propiedades permeables en el campo magnético y aislantes frente a la electricidad, así pues, se puede hacer uso de este tipo de barras en construcciones de obra civil o ingeniería, donde se necesite un nivel concreto de transparencia magnética o aislamiento eléctrico. (Almerich Chulia, Ana I. 2010).

### **2.3.2. Propiedades mecánicas**

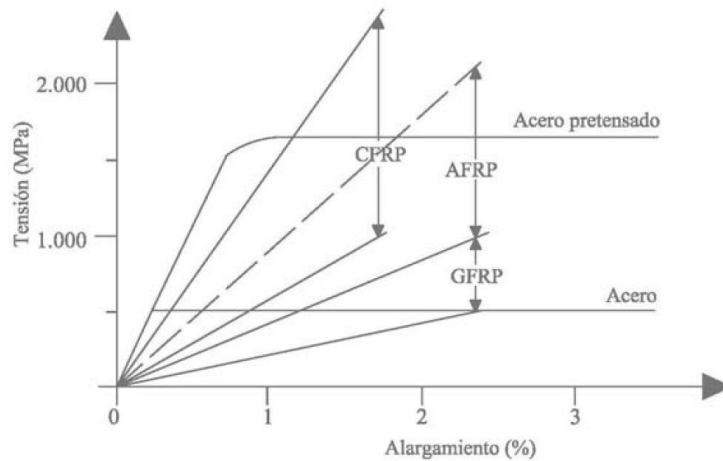
Las barras de GFRP presentan unas propiedades mecánicas que cambian de un producto a otro, debido a que dependen de diferentes características como el tipo de fibra y su orientación, el volumen, el control de calidad en el proceso de producción, etc. La humedad, el tipo de carga aplicada y la duración de esta, y la temperatura afectan a las propiedades mecánicas de los redondos de GFRP.

#### **2.3.2.1. Tracción**

Debido a la característica de anisotropía, las barras de GFRP tienen conductas diferentes ante los esfuerzos de tracción en los principales ejes del redondo. En la dirección transversal domina la matriz polimérica con un comportamiento a tracción bajo, en cambio en la longitudinal predominan las fibras de vidrio, por lo que el comportamiento a tracción es bueno.

Debido a que los redondos de GFRP son elementos longitudinales, la fibra de vidrio es la responsable de resistir a los esfuerzos de tracción. Generalmente, las barras de GFRP poseen una mayor resistencia que las de acero frente a los esfuerzos de tracción, no obstante esto depende de del diámetro de la barra, habiéndose obtenido que la resistencia a tracción se reduce con el aumento del diámetro (Eshani, 1993), puesto que las fibras que se sitúan en el alma de la barra no se someten a un tensión tan elevada como las del extremo, por lo que cuanto mayor es el radio es menor la resistencia a tracción.

A diferencia de las barras de acero, las de GFRP no se plastifican, su comportamiento es linealmente elástico hasta el punto de rotura y, por consiguiente, la rotura de este tipo de barras será frágil (Fig. 8.) (ACI 440. 1R-15).



**Fig. 8.** Comportamiento tensión/alargamiento barras de acero y de FRP.

La resistencia a tracción de las barras de GFRP se encuentra entre 483 - 1600MPa (barras con volumen en fibra entre 50% y 70%), hasta 2 veces mayor a la resistencia del acero, y su alargamiento de rotura varía entre un 1,2% y un 3,1% (Tabla 6.).

Propiedades / Armado	GFRP	CFRP	AFRP	Acero
Límite elástico, MPa	--	--	--	276 -517
Resistencia a tracción, MPa	483 -1600	600 - 3690	1720 - 2540	483 - 690
Alargamiento de rotura (%)	1,2 – 3,1	0,5 – 1,7	1,9 – 4,4	6,0 – 12,0
Alargamiento elástico (%)	--	--	--	0,14 – 0,25
Módulo elástico, GPa	35,0 – 51,0	120 - 580	41,0 - 125	200

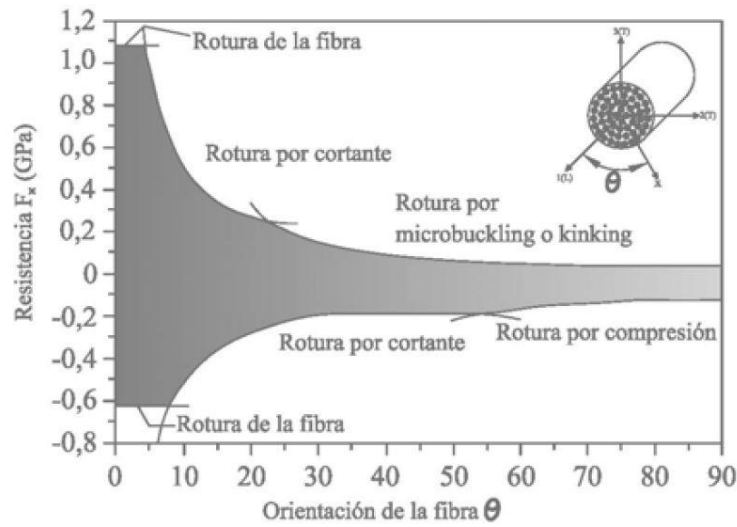
**Tabla 6.** Propiedades mecánicas de los redondos de acero y de FRP.

La resistencia a tracción de las barras de GFRP, a pesar de que las altas o bajas temperaturas no afecten a las fibras de vidrio, si se ve afectada por las elevadas temperaturas. Esta pérdida de resistencia a la tracción es cercana a un 30,0%, 45,0%, 60,0% y 70,0% para temperaturas de 100°C, 200°C, 300°C y 400°C respectivamente, según los estudios llevadas a cabo por (Benmokrane et al, 2000).

Debido a que las propiedades de tracción de las barras de GFRP son diferentes de un producto a otro, el fabricante de la barra debe proporcionar las propiedades y características de las barras de FRP en particular y una descripción del método utilizado para determinar esas propiedades (FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007)

### 2.3.2.2. Compresión

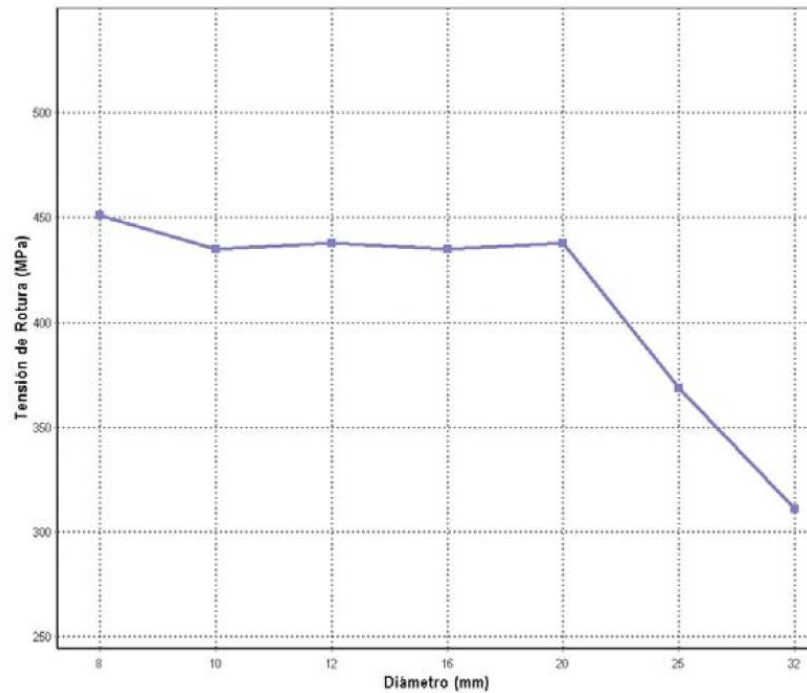
Cuando las barras que nos ocupan están siendo sometidas en su eje longitudinal a compresión, se ocasiona una rotura por micropandeo, una rotura por doblado de la barra al someterse a compresión, así misma rotura por la compresión de la matriz polimérica. Por todo ello concluimos que no se recomienda la utilización de las barras de GFRP en los casos que haya que soportar esfuerzos de compresión (Fig. 9.).



**Fig. 9.** Rotura de los redondos FRP dependiendo de la dirección de tensión.

Las distintas normas de diseño de sistemas estructurales de hormigón armado con barras de GFRP no aconsejan el uso de este tipo de barras en elementos que se someten a esfuerzos de compresión o bien como refuerzo longitudinal en las columnas o como refuerzo de compresión en las barras de flexión (ACI 440. 1R-15; JSCE 1997; CNR - DT 203 / 2006; FIB Task Group 9.3, 2007).

La resistencia a compresión de la barra de GFRP (400 MPa) es mucho menor que la resistencia a tracción, aproximadamente entre un 40% y un 60% de esta última, además está sujeto a una variación significativa (JSCE 1997). Por lo tanto, la resistencia de cualquier barra de FRP en compresión debe ser ignorada en los cálculos de diseño (Almusallam et al. 1997).



**Fig. 10.** Resistencia a compresión según el diámetro de las barras de fibra de vidrio.

En el caso de los esfuerzos a compresión se produce el mismo fenómeno que en los esfuerzos a tracción respecto a la relación entre el diámetro de las barras de GFRP y su resistencia, como se puede observar en la figura 10, la resistencia disminuye cuando el diámetro es mayor.

### 2.3.3. Durabilidad

En este apartado se analiza los procesos de cambio de las propiedades de las barras de GFRP y los mecanismos de los compuestos los cuales afectan a sus propiedades higrotérmicas y mecánicas frente a diferentes condiciones que afectan a la durabilidad como: variables de humedad y temperatura, exposición química, etc.

La durabilidad de un material se define como : “su capacidad para resistir el agrietamiento, la oxidación, la degradación química, la deslaminación, el descaste y/o los efectos de los daños causados por objetos extraños durante un periodo de tiempo determinado en condiciones de carga apropiadas y en condiciones ambientales específicas”, (Karbhari et al. 2003).

Diferentes factores como la química del tamaño de las fibras, el tipo de fibra y resina polimérica, el control de calidad en el proceso de la producción, las condiciones de curado, y la severidad de los agentes ambientales externos, reducen las propiedades mecánicas de las barras de GFRP bajo las diferentes condiciones ambientales. El tipo y la calidad del hormigón también

contribuyen en la reducción de la durabilidad de las piezas de hormigón armado con fibras de vidrio (GangaRao et al. 2007).

Algunas de las diversas situaciones ambientales que pueden alterar las propiedades de los redondos de GFRP en cuanto a su rigidez, relación matriz-fibra, resistencia, etc., son: (GangaRao et al. 1995)

- Ciclos térmicos y Frio prolongado
- Agua (incluida el agua salada)
- Temperaturas elevadas
- Soluciones químicas
- Gradiente térmico (altas y bajas temperaturas a lo largo de la sección de la barra)
- Radiación U.V.
- Oxidación
- Fuego
- Envejecimiento físico y químico

En las barras de GFRP la matriz polimérica es la responsable de preservar las fibras y al composite de los posibles deterioros que se produzcan, mantiene el alineamiento de las fibras y facilita el reparto de las cargas a cada una de las fibras individualmente, mientras que de la resistencia mecánica de las barras se encargan las fibras. Con el fin de aumentar las propiedades de durabilidad de los redondos, se puede añadir diferentes aditivos a la matriz polimérica. (Kato et al. 1998; GangaRao et al. 1995).

Hay que tener especial precaución a la hora de tratar de las barras de GFRP su corte de estas y el recubrimiento integral de las fibras, ya que según sea la superficie sea más o menos continua la resina se comportará de diferente, cualquier fallo en los supuestos señalados puede afectar notablemente a la durabilidad de las barras de GFRP.

La calidad de un compuesto en términos de durabilidad se puede expresar mediante el siguiente número de factores: (FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007)

- La resina este húmeda (para que todas las fibras estén bien cubiertas por la resina)
- Ausencia de grietas (tanto en la superficie como en la sección transversal)
- Ausencia de huecos
- Controlar el grado de curado (el proceso de producción debe estar bien controlado para ofrecer una mejor protección)
- Interfaz fibra-matriz debe ser fuerte (una mala selección o proceso incorrecto puede dar lugar a una interfaz propensa al ataque ambiental)

Para mejorar las ventajas de durabilidad es necesario la elección de la resina adecuada para la matriz polimérica, esta debería ser: intrínsecamente capaz de resistir los ataques de los álcalis y cloruros, fuerte para resistir micro-roturas, impermeable para resistir la penetración de los agentes exteriores y muy compatible con las fibras de vidrio para asegurar una buena unión de matriz-fibras.

### 2.3.3.1. Efecto del agua

La humedad relativa (%RH) presente en aire a distintas temperaturas, afecta de un modo determinante en los efectos que ocasiona el agua en las barras. “Por ello estos factores se han de tener en cuenta ya que pueden provocar cambios en su módulo de elasticidad y la resistencia a tracción de las barras” como afirman Bank y Gentry, en su investigación en 1995.

Las resinas poliméricas se deterioran debido a la actuación de las moléculas de agua como plastificantes de las resinas por interrumpir los enlaces Van-der-Waals en las cadenas de polímeros. Esto provoca ciertos cambios y la disminución de las propiedades mecánicas como: módulo elástico, resistencia, tensión de fallo, la dureza y tensiones que llevan al agrietamiento de la matriz polimérica (FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007). Esta pérdida de las propiedades se produce en temperaturas elevadas, superiores a 60°C, cuando aumenta el contenido de absorción de humedad en la saturación (en concreto las resinas de poliéster tienen mayor difusividad del agua).

Según los estudios de Parkyn. 1985 y Rao et al. 1981: “la penetración del agua en las barras de GFRP se puede producir por dos fenómenos...”

- “...Por difusión de a través de la matriz polimérica: las moléculas de agua se infiltran dentro de la matriz y se unen a los enlaces de hidrógeno del polímero, aumentando la cantidad de agua.”
- “...Por las grietas o por los poros formados en la superficie de las barras, el agua penetra por capilaridad.”

Algunas investigaciones realizadas al respecto han llegado a la conclusión de la resistencia a tracción de los redondos cuando están afectadas por el agua y con una temperatura media entre 25,0°C – 60,0°C – 70,0°C, no experimentan una pérdida de resistencia en un periodo de 365 días de ensayo. Este fenómeno se debe al tipo de matriz polimérica empleada, debido a que poseen un coeficiente de absorción de humedad bajo (Calvet Rodríguez, V. 2014).



### 2.3.3.2. Efecto de los cloruros

En los ambientes salinos es susceptible de corrosión en los casos de no existir una protección adicional, por ello, una de las aplicaciones más importantes de las barras de polímero es en este medio. Sasaki et al. 1997; Saadatmanesh y Tannous. 1997; Sen et al. 1997; Chin et al. 1997; Gangarao y Vijay. 1997; Rahman et al. 1998; Steckel et al. 1998; Toutanji y El-Korchi. 1998, han llevado a cabo diferentes estudios exponiendo estas barras en ambientes con una concentración de cloruro de hasta un 4%, con una variación de temperaturas entre 20°C - 70°C y una variación de la humedad relativa ambiental y se ha demostrado que la reducción de la resistencia mecánica en barras de GFRP y en las de AFRP se produce una disminución de rigidez y resistencia hasta un 50%, mientras que en los redondos de CFRP la disminución de las propiedades mecánicas es insignificante.

### 2.3.3.3. Efecto de los álcalis

Aunque el hormigón preserva el refuerzo de acero, la alcalinidad del hormigón puede afectar a las fibras de vidrio, a menos que se utilicen resinas poliméricas adecuadas con el fin de proteger las fibras. En general, las fibras que tienen mejor resistencia para el efecto de los álcalis son las de carbono, luego las de aramida y por último las fibras de vidrio (Machida. 1993).

Diferentes investigadores han realizado estudios de ruptura por tensión bajo diferentes cargas en diferentes entornos y se han llegado a identificar las diferentes circunstancias que afectan a la tasa de ataque alcalino del FRP: (FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007)

- El tipo de fibras y la susceptibilidad de estas al ataque de los álcalis
- La difusividad de los álcalis de la resina y, por lo tanto, el nivel de protección
- La calidad de enlace fibra-matriz, a través del cual, el álcali puede penetrar y atacar las fibras
- La temperatura
- La concentración del álcali, afectada por el tipo de cemento y mezcla de hormigón
- La movilidad de los iones alcalinos, afectadas por el nivel de saturación y el volumen de los poros

Actualmente, no existe un método aceptado para comprobar el efecto de los álcalis en las barras de GFRP, por ello se han llevado a cabo numerosas investigaciones con diferentes formas de análisis, resinas, temperaturas, tipos de barras, etc., han llevado a conclusiones muy diversas. Acompañamos la tabla 7 en la que se puede observar alguna de las investigaciones realizadas, y en la que se muestra el resultado de la pérdida de resistencia obtenida dependiendo de los materiales empleados, el ambiente, la temperatura y la duración del ensayo.

Autor	Resina	PH	Ambiente	Temperatura	Duración	Pérdida resist.
Benmok rane et al. 2005	VE: d= 9,50 mm	12, 8	ACI	64°C	60 días	12%
	9,5mm			20°C	420 días	15%
	12,7mm			57°C	120 días	17%
	16mm			55°C	30 días	2%
	16mm			61°C	120 días	16%
Porter 1997		12, 5- 13	Saturado Ca(OH) <sub>2</sub>	60°C	90 días	55%
				60°C	90 días	73%
				60°C	90 días	0%
Allmusal lam Al- Salloum 2005	VE	>13	Pasta de cemento 1% Na <sub>2</sub> O en agua de mar	40°C	120 días	2,1%
				40°C	240 días	15,6%
				40°C	480 días	19,7%
				40°C	120 días	29,4%
				40°C	240 días	39%
				40°C	480 días	47,9%
Alsayed Alhozai my 1998	VE+UP		Pasta de cemento	Exterior	120 días	20%
					120 días	0%
	VE+UP		20g/l NaOH		120 días	30%
					120 días	0%
Weber 2004	VE	13,	Saturado	60°C	2000 h	<5%
	VE	7	Ca(OH) <sub>2</sub>	60°C	2000 h	<5%
	VE		NaOH KOH	60°C	2000 h	<5%

**Tabla 7.** Ensayos reducción resistencia a tracción en barras de GFRP por efecto de los álcalis.

Tras el análisis de la tabla 7 proporcionado por las normas de diseño de sistemas estructurales de hormigón armado con FRP FIB Bulletin 40, Task Group 9. 3. 2007, llegamos a la siguiente conclusión: la forma de responder las barras a los ataques de los álcalis cambia en función de diversos factores, tales como: el proceso de elaboración y materiales utilizados. La reducción de la calidad de los redondos de GFRP aumenta cuando están en presencia de soluciones alcalinas con altas temperaturas, así mismo se concluye que las resinas de poliéster muestran una menor resistencia a los álcalis que las resinas de viniléster.

En la tabla 8 se representa un resumen de diferentes estudios realizados por la universidad de Chalmers que muestra que la resistencia a tracción de las barras de GFRP en soluciones alcalinas disminuye, frente al hormigón y frente al agua con temperaturas de 20°C y 60°C (Dejke. 2001).

Exposición	Temp. (°C)	Edad de la prueba (días)				
		28	90	180	365	545
% de la fuerza a tracción original						
Álcalis	60°C	82	55	37	32	31
Hormigón	60°C	91	80	57	51	45
Agua	60°C	93	84	75	73	72
Conjunto	20°C	95	92	90	88	80

**Tabla 8.** Efecto de la temperatura en barras de GFRP expuestas a álcalis, hormigón y agua.

Los resultados obtenidos en la tabla 8 muestran que los ambientes más agresivos son los álcalis a 60°C, seguido del hormigón a 60°C. Debido a los resultados obtenidos en los diferentes estudios podemos concluir que en los entornos cálidos hay un gran efecto de degradación de las barras de GFRP, por lo que se deben utilizar factores de seguridad adicionales.

El conjunto de normas sobre el diseño de sistemas estructurales con FRP, FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007, concluye que el rendimiento de las fibras de refuerzo de GFRP en el entorno de los álcalis está en función de diversos factores tales como el tipo de fibras / resinas utilizados, así como con los procesos de ejecución. (FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007).

#### 2.3.3.4. Efecto de la radiación ultravioleta

Solo en los momentos de almacenamiento y acopio, las barras de FRP se ven afectadas por los efectos de la radiación ultravioleta (UV), debido a que una vez las barras se integran en la estructura, el hormigón se encarga de recubrirlas y protegerlas de este tipo de radiación. Las barras de FRP se muestran afectadas con daños fotoquímicos en la superficie por la radiación U.V., esto produce una pérdida de color y da paso a una disminución peso molecular (Kato et al. 1997), por lo que se reduce la durabilidad.

En un trabajo de investigación que realizan Kato et al. en 1997 se abordó la reacción de las barras de CFRP, AFRP y GFRP, al ser sometidas a radiación de rayos U.V. (0,2MJ/m<sup>2</sup>//hora) y ciclos de secado/ humectación (250, 750 y 1250 ciclos de secado/ humectación) a 26°C, se llegó a reducir la resistencia a tracción alrededor de un 13,0 % en barras de aramida tras ser expuestas a 2500 horas, de un 8,0 % en barras de fibra de vidrio tras ser expuestas a 500 horas, y 0% en barras de carbono. Por otro lado, no se produjo degradación en las fibras de carbono, vidrio y aramida, que fueron expuestas durante 1000 horas el mismo ambiente. (Calvet Rodríguez, V. 2014).

Las fibras de vidrio se ven más afectadas por la radiación U.V. que las de carbono o las de aramida. Esta acción es más dañina para los compuestos delgados que para los gruesos, como ha quedado demostrado en diferentes ocasiones.

Algunos resultados de pruebas combinadas de exposición a los rayos ultravioletas y a la humedad con y sin tensión aplicada a las barras han mostrado reducciones de la resistencia a la tracción de 0 a 40% en el GFRP (Sasaki et al. 1997; Uomoto 2000; ACI 440.1R-15. 2006)

Para contrarrestar el efecto de la radiación ultravioleta, se pueden añadir durante el proceso de fabricación aditivos inhibidores de radiación UV a la matriz polimérica. (GangaRao, 2006) también se recomienda antes de su colocación en el hormigón que las barras de FRP se protejas de la exposición directa a la luz solar y la humedad.

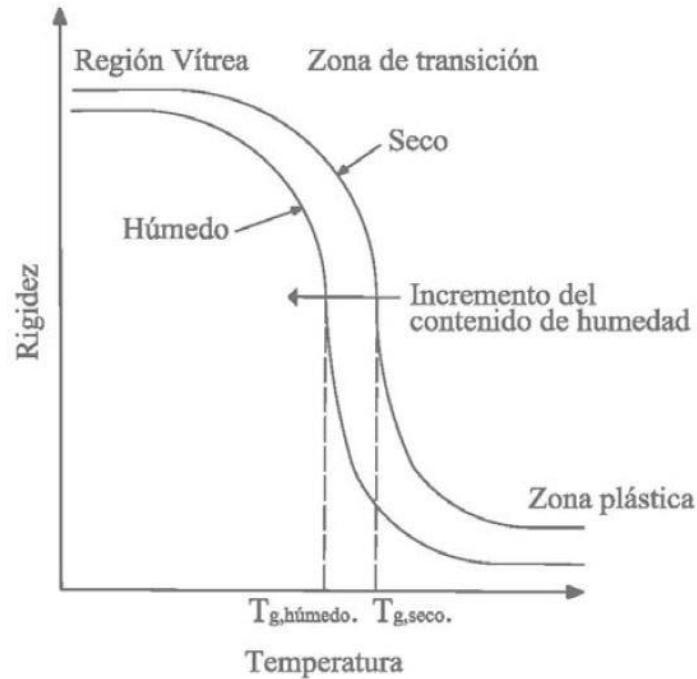
### 2.3.3.5. Efecto de la temperatura

El efecto de la temperatura deteriora la durabilidad de las barras de GFRP debido a los materiales que conforman las barras (fibras y matriz polimérica) presentan coeficientes de expansión térmica transversal y longitudinal diferentes, por lo cual la unión se ve afectada. (Bulletin 40. FIB, Task Group 9.3. 2007).

“Las propiedades a largo plazo (fluencia, fatiga y relajación) así como las propiedades a corto plazo (resistencia a tracción, compresión a cortante y el módulo elástico) y la absorción de humedad de las barras de GFRP, se ven modificadas por el efecto de la temperatura”, tal y como afirman: Devalapura et al. 19; Allred. 1984; 98; Katz et al. 1998-1999; GangaRao et al. 2001; Pritchard y Speake. 1998.

Los cambios higrotérmicos, expansiones y contracciones en el material, afectan a la distribución de tensiones en el compuesto. Este cambio se produce por la hinchazón del compuesto debido al aumento de la temperatura o el contenido de humedad y la contracción se debe a la disminución de la temperatura o del contenido de humedad. (GangaRao et al. 2007).

La temperatura de transición vítrea “ $T_g$ ” es aquella a partir de la cual la matriz polimérica empieza a disminuir la rigidez. El módulo elástico de la matriz polimérica se empieza a reducir a partir de “ $T_g$ ” debido a los cambios en su estructura molecular. El valor “ $T_g$ ” de las barras de GFRP depende de los tipos de resina empleadas. En ambientes de humedad elevada La  $T_g$  disminuye (Fig. 11.).



**Fig. 11.** Variación de la  $T_g$  según la rigidez del polímero y el grado de humedad.

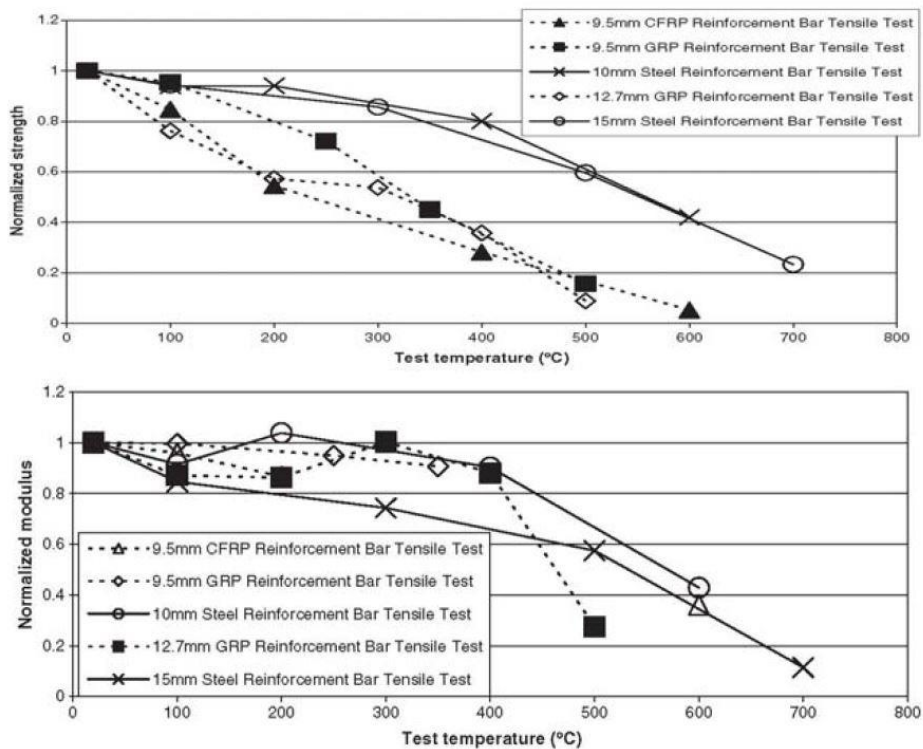
Un aumento continuo de la temperatura más allá de este punto ( $T_g$ ) produce una rápida transición del polímero del comportamiento vítreo a un comportamiento plástico, por lo que las propiedades principales en la matriz, como la rigidez al corte o la resistencia se reducen, y el material se vuelve demasiado blando para su uso estructural (Gibson. 1994).

Las fibras de las barras de FRP (vidrio, aramida y carbono) presentan una elevada resistencia a las altas temperaturas, sin embargo, no solo depende de las fibras para que las tensiones internas de las barras se transmitan, sino que también debemos de considerar la adherencia de las fibras y la matriz, por lo que la resistencia mecánica de la adherencia entre matriz - fibras disminuirá, ya que está en función de lo que resista la resina polimérica frente a elevadas temperaturas. Al contrario que las fibras de FRP, la resistencia habitual del acero si se ve afectada por las temperaturas, ya que cuando está sometida a  $870,0^{\circ}\text{C}$  la resistencia es del 15,0%, además la adherencia entre la armadura y el hormigón también puede verse afectada.

Katz, Bermman et al. (1999) realizaron diferentes investigaciones con pruebas de adhesión a temperaturas elevadas. Los resultados que obtuvieron es que todas las armaduras de FRP sufrieron una disminución de las de la fuerza de adherencia dependiendo del  $T_g$  de la resina utilizada. En torno a un 90% de la fuerza de adherencia se pierde a  $250^{\circ}\text{C}$  en las armaduras probadas. (FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007). Se ha demostrado también que la matriz polimérica de viniléster presenta una degradación menor frente al efecto de la temperatura que la matriz de poliéster.

Kumahara et al. (1993), realizaron una investigación sobre cómo influyen las temperaturas elevadas en la resistencia a tracción de las barras de CFRP y GFRP, concluyendo que: “las barras de CFRP y GFRP presentan una resistencia alrededor de 0% - 20% de su resistencia inicial ante la exposición prolongada a una temperatura de 250°C”.

Y. C. Wang et al. (2007), llevaron a cabo un estudio sobre la relación de las elevadas temperaturas con el comportamiento mecánico de las barras de FRP (GFRP y CFRP). Para ello realizaron ensayos de tracción a 20°C, 100°C, 250°C, 350°C y 500°C (Fig. 12.), llegando a la siguiente conclusión: “las barras de FRP presentan una temperatura crítica de uso alrededor de 350°C”.



**Fig. 12.** Comportamiento mecánico en barras de GFRP, CFRP y acero frente a diferentes temperaturas.

La continua exposición de las barras de GFRP a bajas temperaturas (en torno a los 0°C) produce variaciones de resistencia y rigidez en los polímeros, lo que da lugar a un fallo por fragilidad. Este efecto está relacionado con el estado vítreo de movimientos moleculares. Una disminución de temperatura puede dar lugar a un incremento del módulo elástico y de las resistencias a tracción, flexión, fatiga y fluencia. Además, una disminución de la temperatura puede producir en las barras de GFRP reducciones de la deformación, de la resistencia al impacto, de la fuerza de compresión y del coeficiente de expansión térmica. (GangaRao et al. 1995; Allred. 1984; Kelen. 1983).

### **2.3.3.6. Efecto de la carbonatación del hormigón**

Actualmente no existen apenas estudios sobre el efecto de la carbonatación del hormigón sobre las barras de FRP, no obstante, podemos resaltar el proyecto europeo EUROCRETE, en el cual, si bien los datos obtenidos fueron muy variables, no se observó que la durabilidad de las barras se viese afectadas por este fenómeno, sino todo lo contrario, se concluyó que su vida útil aumentaba. (Bulletin 40. FIB, Task Group 9.3. 2007).

En el estudio de Sheard et al. 1997 se concluye la investigación afirmando que es poco probable que la carbonatación promueva el deterioro de las barras de FRP en el hormigón. Por el contrario, es probable que la reducción asociada del pH aumente la vida útil y mejore la durabilidad del hormigón reforzado con FRP, ya que reduce el álcali del agua de los poros del hormigón que ataca a algunas fibras y polímeros (Sheard et al. 1997).

### 3. DISEÑO Y PROCESO DE EJECUCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS CON ARMADO DE GFRP

---



### **3. Diseño y proceso de ejecución de las estructuras con armado de GFRP**

En este capítulo se presentan las recomendaciones generales de diseño para los sistemas estructurales de hormigón reforzados con armadura de GFRP, estas recomendaciones se fundamentan en los principios de diseño frente a estados límite, ya que el hormigón reforzado con fibra de vidrio se diseña en base a su resistencia requerida y se comprueba la resistencia de los elementos en base a las tensiones generadas. También se ha de tener en cuenta el comportamiento menos rígido de las barras de GFRP, los esfuerzos de cortante en las barras así como los mecanismos que controlan la rotura.

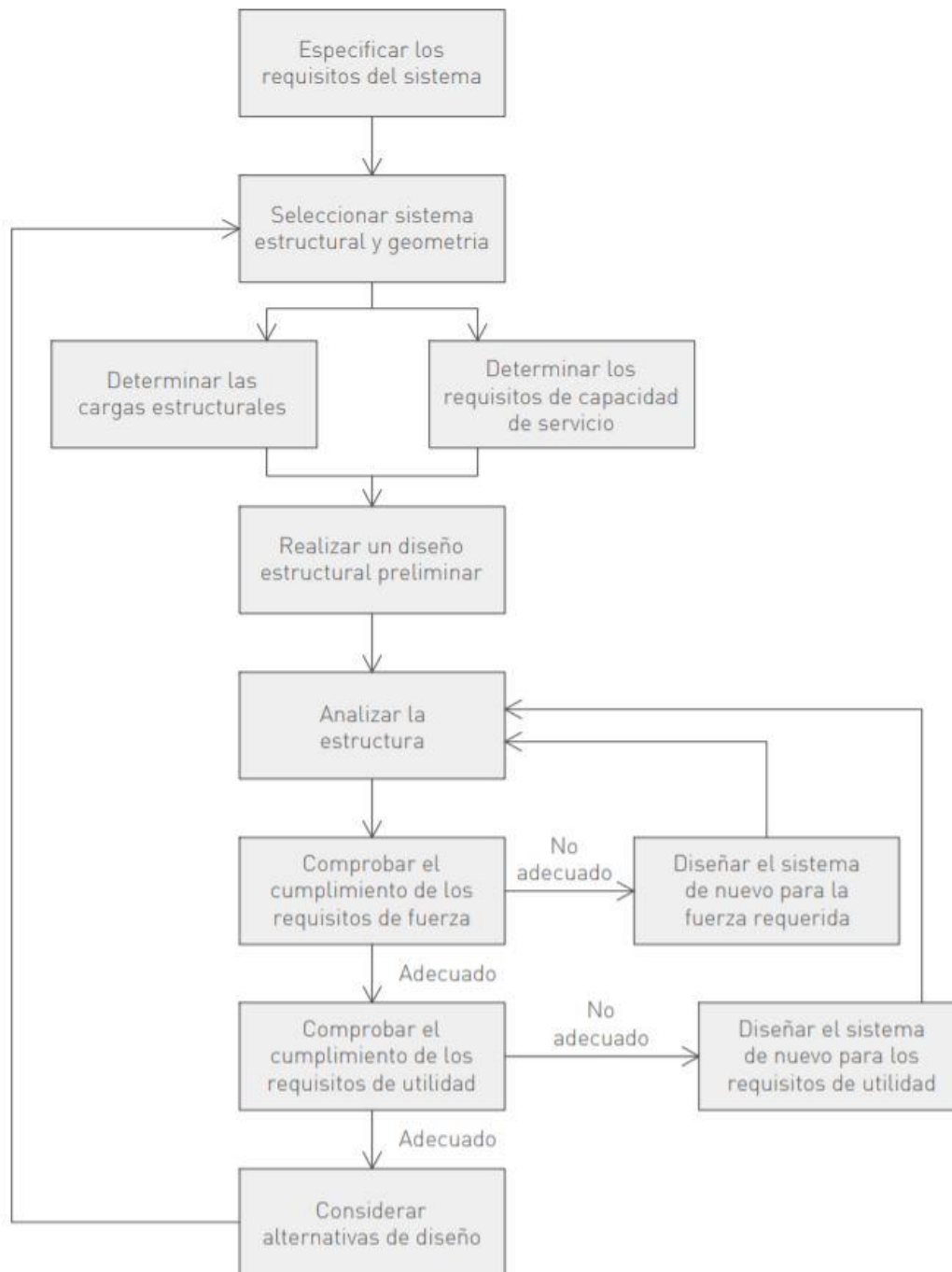
Por otra parte, en este capítulo también se presentan las recomendaciones generales para la ejecución de los sistemas estructurales de hormigón reforzado mediante barras de GFRP, así como las diferencias con los sistemas estructurales tradicionales de hormigón con barras de acero como armado durante el proceso de ejecución, tanto durante su manipulación y almacenamiento de los materiales como en la colocación y ensamblaje.

#### **3.1. Análisis en el proceso de diseño**

El principio básico en el que se basan las recomendaciones existentes para el diseño de las estructuras de FRP es que suponiendo en que se pueda desarrollar una adherencia adecuada entre el hormigón y las barras, la sección de hormigón experimenta fuerzas y tensiones independientes del material de refuerzo a flexión. Por lo tanto, si un diseño con barras de refuerzo de FRP mantiene la misma tensión en el refuerzo longitudinal y se desarrollan las mismas fuerzas de diseño, ese diseño conducirá a un resultado seguro. (FIB Bulletin 40, Task Group 9.3. 2007).

En la figura 13 se representa un esquema conceptual sobre el proceso de diseño de un sistema estructural, la intención de este esquema es proporcionar algunas directrices sobre la información que se necesita para la toma de decisiones y realizar un correcto diseño.

En el esquema conceptual se puede observar que en el diseño de una estructura se debe tener en cuenta un buen sistema tanto para los requisitos de fuerza como para los de utilidad. Los requisitos de fuerza son fundamentales ya que la estructura debe soportar las cargas a las que está sometida, basándose en la teoría de los estados límite. Por otra parte, los requisitos de estado límite último están basados en la respuesta elástica y deformaciones. Una parte importante en el diseño estructural es la consideración de alternativas de diseño, con la intención de optimizar el rendimiento del sistema (McCormac, J. C. y Nelson, J. K. 2006).



**Fig. 13.** Proceso de diseño sobre el sistema estructural.  
Adaptación de McCormac, J. C., & Nelson, J. K. (2006)

La gran mayoría de las normativas de diseño de estructuras de hormigón reforzado con barras de FRP como armadura se han desarrollado partiendo de las normas de diseño de estructuras de hormigón armado con acero. No obstante, algunas investigaciones han llegado a la conclusión que las propiedades del comportamiento mecánico y físico de las armaduras de FRP son distintas al de las barras de acero (Calvet Rodríguez, V. 2014).

Teniendo en cuenta que la norma de Hormigón Estructural EHE-08 es el marco reglamentario que establece las necesidades que ha de satisfacer una estructura de hormigón, con el fin de cumplir los requisitos de seguridad estructural, en este punto se desarrolla un análisis de esta Norma con el fin de cumplir los requisitos necesarios de diseño estructural, dentro de los cuales encontramos:

### 3.1.1. Adherencia

Una de las características más importantes para diseñar las secciones de las estructuras de hormigón armado con FRP, es la óptima adherencia entre armadura y hormigón. Este factor es muy importante en la eficiencia estructural, en caso de una mala adherencia entre hormigón y armadura, y la estructura no pueda funcionar como un único elemento, no importa la resistencia del armado.

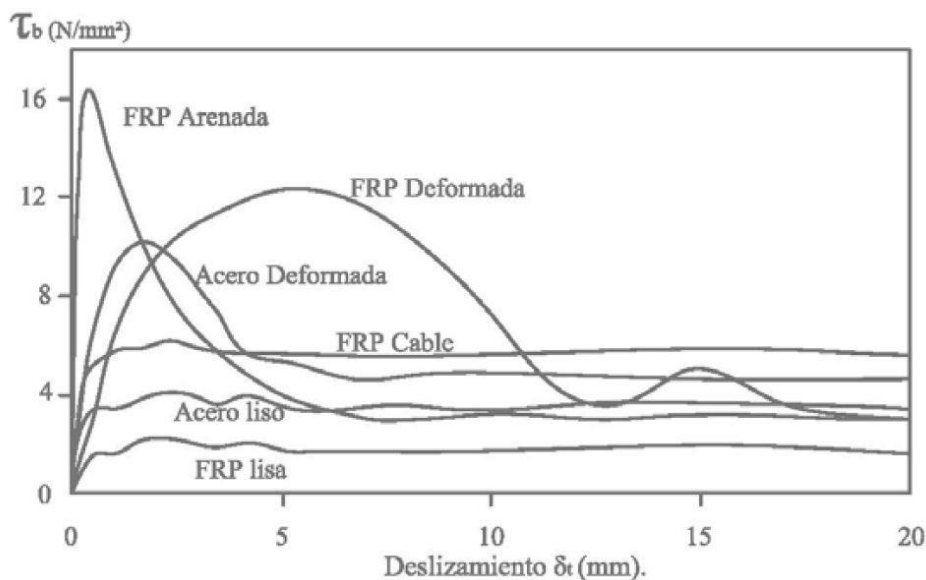
La adherencia afecta a dos aspectos, por una parte al comportamiento frente a torsión, cortante y punzonamiento y por otra al diseño frente a estados límites últimos y de servicio, esto es así ya que influyese en la capacidad portante de la sección, así como en la separación y el ancho entre fisuras. Así pues, la adherencia podemos concluir que según Cosenza et al. 1997, Pecce et al. 2001 y Edwards et al. 1978 es el mecanismo más importante y debe garantizarse ante cualquier condición ambiental y carga.

Existen diversos factores que afectan a las características de la adherencia entre la armadura y el hormigón. La adherencia puede variar según:

- La resistencia a tracción, y la resistencia compresión, son dos de las propiedades del hormigón a destacar, así como la compactación, la retracción, el tipo de áridos, la consistencia y relación agua/cemento (que es uno de los parámetros más importantes, ya que a mayor relación menor adherencia).
- Con respecto al armado, las propiedades a considerar son: el diámetro de las barras ya que existe una menor adherencia cuando el diámetro es más grande; la rugosidad y el acabado superficial (tienen un papel muy importante ya que las corrugas son las encargadas de transmitir los esfuerzos del hormigón a la armadura); y por último la plastificación de las barras, que perjudica a la unión con el hormigón.
- El diseño de las estructuras también juega un papel importante, ya que, para conseguir una buena adherencia entre el hormigón y las barras, los factores a considerar son: la separación entre las armaduras, el recubrimiento de hormigón, la posición de las armaduras en el proceso de hormigonado y la existencia de armado transversal.

- En el proceso de fabricación también influye en la adherencia el control del curado, y el vibrado y la dirección del vertido del hormigón, ya que si se vierte en sentido paralelo a la posición de las armaduras la adherencia es mejor.
- Y con respecto a la temperatura, Van der Veen. 1992 afirmó: “cuando una estructura se somete a temperaturas elevadas, la adherencia disminuye, sobre todo a partir de los 400°C, en cambio en temperaturas bajas, las condiciones de adherencia mejoran”.

El comportamiento de adherencia entre el hormigón y la armadura de GFRP y ha sido objeto de diferentes estudios en las últimas décadas, sin embargo, no podemos afirmar que exista una norma general para el comportamiento de adherencia común para las distintas barras reforzadas con fibra de vidrio, ya que hoy en día no existe una estandarización para este tipo de barras, sino que en cada estado o país hay diferentes tipos de barras de GFRP, lo que nos lleva a comportamientos de adherencia distintos (Fig. 14.). Debido a estos motivos, “la tensión de adherencia de las barras reforzadas con fibra de vidrio no llega a ser como la de las barras de acero” según Cosenza et al. 1997. El acabado de la superficie de las barras también influye en la adherencia de las armaduras de fibra de vidrio con el hormigón: las barras que presentan salientes en su superficie presentan puntos de anclajes con el hormigón, lo que conlleva a una mejor adherencia.



**Fig. 14.** Comportamiento adherente de las barras de acero y FRP.

Según un ensayo de Mohammed amine en 2014 afirma que: “la tensión adherente media de las barras de GFRP del diámetro de 10 mm es de 7,7 MPa”.

### 3.1.2. Bases de cálculo

Las estructuras se han de proyectar y construir de forma que su nivel de seguridad garantice que sean capaces de resistir todas las acciones a las que esté sujeta mientras dure el proceso de ejecución y durante su vida útil.

Para asegurar que estas exigencias se cumplen por una parte las solicitaciones de la estructura no debe superar los estados límite para los que ha sido proyectada. El estado límite se define como las situaciones en las que el sistema estructural incumple algunas de las competencias para las que ha sido diseñada, sobrepasando un valor límite. La EHE-08 clasifica los estados límite en los siguientes: (Almerich Chulia, A. I. 2010)

- Estados Límites últimos (ELU), son las situaciones en las que se produce una puesta fuera de servicio del sistema estructural o bien rotura por o por colapso de la estructura, es decir, cuando se sobrepasa la capacidad máxima de la resistencia de las estructuras.
- Estados Límites de servicio (ELS), se producen cuando se da una puesta fuera de servicio del sistema estructural por motivos de comodidad, funcionalidad o estética.
- Estado Límite de durabilidad (ELD), son los relativo a la duración de la estructura u su vida útil, producidos por las acciones químicas y físicas capaces de degradar las propiedades de las armaduras y del hormigón.

Para asegurar que la estructura cumple todas sus funciones hemos de verificar, para cada Estado Límite, que los resultados procedentes del cálculo son menores o iguales a las resistencias últimas. Para ello, se introducen unos valores característicos, ponderados con unos coeficientes de seguridad parciales, por lo que se tiene en cuenta los incrementos y disminuciones de la resistencia de los materiales y de las acciones, con el fin de reducir la probabilidad de fallo dentro del límite aceptable.

Para conseguir una estructura con un nivel de seguridad adecuado, también hay que tener en cuenta los valores de las resistencias características de los materiales empleados: la resistencia característica de las barras de fibra de vidrio ( $f_{fk}$ ), la resistencia característica del hormigón ( $f_{ck}$ ); así como la resistencia de cálculo de los materiales, tanto la de las barras de fibra de vidrio ( $f_{fd}$ ), como la del hormigón ( $f_{cd}$ ), en la que se emplean unos coeficientes de minoración (tablas 9 y 10), que ante una posibilidad de reducción tratan de cubrirla.

Situación de proyecto	Hormigón
Accidentales o sísmicas	1,3
Persistentes o transitorias	1,5

**Tabla 9.** Coeficiente minoración del hormigón según EHE-08.

Ambiente / exposición	Tipo de fibra	$C_g$
Ambiente no agresivo	CFRP	1,0
	GFRP	0,8
	AFRP	0,9
Hormigón en relación con agua y terreno	CFRP	0,9
	GFRP	0,7
	AFRP	0,8

**Tabla 10.** Coeficiente minoración  $C_g$  del FRP según ACI 440.1R-15.

Sobre una estructura, actúan además de las cargas permanentes, las cargas variables, si bien es poco probable que todas ellas lo hagan de forma simultánea con su valor más alto, por ello, se trabaja con los valores representativos de las acciones. Se realizan diferentes combinaciones de carga para generar las consecuencias menos favorables con respecto a cada uno de los estados límite (Almerich Chulia, A. I. 2010).

### 3.1.3. Tensiones normales

Para llevar a cabo un buen diseño de las secciones de hormigón armado, hay que realizar la comprobación de agotamiento bajo las tensiones normales. Se define según las normas de diseño ACI 440.1R-15 el estado límite de agotamiento bajo tensiones normales como:

- “Cuando las armaduras tengan una deformación excesiva que alcance un 0,9‰ en las zonas traccionadas, y en las comprimidas se obtenga un valor mayor al que origine la compatibilidad de deformaciones”.
- “Cuando se produzca aplastamiento de la zona comprimida del hormigón que dé lugar a una deformación del 3.5‰ en estados tensionales de flexión, cuando el aplastamiento del hormigón alcance una deformación del 2‰ en estados tensionales de compresión simple o compuesta”.

Antes de calcular las tensiones normales, es necesario plantear unas hipótesis básicas de comportamiento como son: el agotamiento de la pieza, la hipótesis de Bernoulli, la compatibilidad de deformaciones, comprobación de la “Ley Tensión - Deformación de las fibras” y la “Ley Tensión - Deformación del hormigón” y la condición de equilibrio.

Una sección puede estar sometida a tensión simple o bien a flexión compuesta, el primer caso se produce cuando sobre ella actúa un momento flector y con respecto a la flexión compuesta caben los siguientes estados tensionales:

- Tracción simple o compuesta, en el cual las fibras se encuentran traccionadas;
- El estado de flexión, donde encontramos fibras comprimidas y otras traccionadas; y
- El estado de compresión simple o compuesta, donde todas las fibras están comprimidas.

Para cada tipo de combinaciones de esfuerzos y con el fin de dar solución al problema de las tensiones tangenciales y poder realizar el cálculo de secciones, se realizan diferentes condiciones de equilibrio y compatibilidad de deformaciones para poder determinar la cuantía mínima de armaduras tanto longitudinales como transversales a colocar en la pieza de hormigón. Dentro de las cuantías mínimas hay que distinguir:

- Las geométricas, se obtienen del cociente entre el área de las fibras de vidrio en tracción y el área del hormigón
- Las mecánicas, que se derivan del cociente de la capacidad mecánica de la fibra de vidrio y la del hormigón.

#### 3.1.4. Tensiones tangenciales

El objetivo del cálculo a tensiones tangenciales (esfuerzo cortante) es poder garantizar la seguridad frente a la rotura. Para realizar los cálculos de tensiones tangenciales mediante barras de GFRP primero hay que tener unas consideraciones generales frente a este esfuerzo: las barras de GFRP resisten mejor que el acero los esfuerzos a tracción y no son materiales dúctiles, presentan un módulo de elasticidad bajo (40.000 MPa) y tienen baja resistencia a esfuerzo cortante.

Se puede llegar al estado límite de agotamiento o bien por el agotamiento de la resistencia a tracción del alma o por de la resistencia a compresión. Para comprobar los estados límites de agotamiento por esfuerzo cortante se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{rd} = V_d + V_{cd} \quad (\text{Ec. 5.})$$

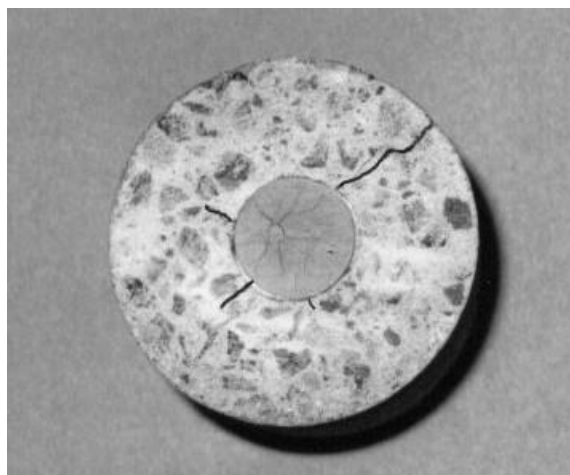
Dónde:  $V_d$  es el valor del cálculo a cortante y

$V_{cd}$  es el valor de cálculo de la componente paralela a la sección de la resultante de las tensiones normales, tanto de tracción como de compresión.

Una vez realizadas las comprobaciones de estado límite de agotamiento al que nos estamos refiriendo, se dispone la cuantía necesaria de armadura y la correspondiente separación de estribos. Según la normativa EHE-08: "al menos un tercio de la armadura transversal necesaria se dispondrá en forma de estribos normales a la directriz de la pieza. Y la cuantía mínima de armadura transversal dispuesta en una pieza longitudinal  $d$ , tendrá una capacidad resistente:  $U_{t,min} = 0,02 \cdot b \cdot d''$ .

### 3.1.5. Fisuración

La aparición de fisuras en los sistemas de hormigón armado es algo implícito en la naturaleza del material. La utilización de armaduras de GFRP con mayor resistencia, requiere que el hormigón que las envuelve, alcance deformaciones superiores a las compatibles por su capacidad resistente a tracción, por lo que cuando supera su capacidad resistente se produce la fisuración (Fig. 15.).



**Fig. 15.** Fisura producida en probeta cilíndrica de hormigón reforzado con GFRP.

Como las barras de GFRP resisten al efecto de la corrosión, podemos incrementar el ancho máximo de fisura, ya que el motivo principal que limita el diseño en barras de acero es la corrosión. No obstante, hay que considerar también otras cuestiones como los efectos de cortante al aumentar la anchura y la estética.

Diferentes normativas que hablan sobre el límite de anchura en la fisura para los elementos de hormigón armado. Una de las cuestiones que tiene en cuenta la sociedad japonesa de ingeniería civil a la hora de diseñar el ancho de grietas máximas permitidas (0,5 mm) es el factor estético. La norma CSA S806-02 permite un ancho de grieta de 0,5 mm para la exposición exterior y 0,7 mm para la interior. La norma ACI 318-05, pese a que no se refiere a las armaduras de GFRP, fija una anchura máxima de fisura de 0,4 mm. No obstante de que la norma EHE-08 estima un ancho de fisura máxima en lo referente a la disposición del armado con barras de acero, se toman como valores los dados por la CSA S806-02 (tabla 9.) (Almerich Chulia, A. I. 2010).



Código	Exposición	$W_{max}$ (mm)
CSA S806 - 02	Interior	0,7 mm
CSA S806 - 02	Exterior	0,5 mm

**Tabla 11.** Límite del ancho de fisura para los elementos de hormigón armado con FRP.

### 3.1.6. Deformaciones

Debido a las propiedades de las barras de GFRP como la rigidez inferior, las propiedades elástico-frágiles y a las características de adherencia, la deformación de los elementos de hormigón armado con este tipo de barras se ven más afectados por las variables que afectan a la flecha, que los elementos de hormigón armado de acero tradicional. Por lo que las flechas de las secciones de hormigón armados con GFRP suelen ser mayores debido a la menor rigidez de este material. También se ha investigado que la deformabilidad del hormigón armado está en función del módulo elástico, por ello las barras de GFRP presentan mayores deformaciones.

## 3.2. Análisis en el proceso de ejecución

En este punto analizamos la diferencia del proceso de ejecución entre las estructuras compuestas por barras de GFRP y las estructuras tradicionales compuestas por redondos de acero corrugadas.

El uso de las barras de GFRP está probado como una de las mejores opciones para evitar los problemas de deterioro del hormigón debido al efecto de la corrosión de los materiales de refuerzo tradicionales.

### 3.2.1. Manipulación y almacenamiento

Las barras de refuerzo de GFRP son más susceptibles de sufrir daños en la superficie que las barras tradicionales de acero. Si se perfora la superficie se puede reducir significativamente la resistencia de las barras de fibra de vidrio, la durabilidad de las barras de GFRP puede verse afectada por los daños en la superficie por la infiltración de los álcalis. Las propiedades de los componentes de las barras de GFRP pueden cambiar con el tiempo, la temperatura y la humedad, por lo que la normativa ACI 440 recomienda una serie de directrices para reducir al mínimo los daños de las barras:

- Los redondos de GFRP no deben ser almacenados en el suelo, sino que han de estar en superficies con el fin mantenerlos limpios y proporcionar un fácil manejo.
- Deben evitarse las altas temperaturas y los rayos ultravioletas, por lo que las barras deben protegerse del sol y el material almacenado al aire libre estará cubierto en todo momento. Deben evitarse también las sustancias químicas como disolventes que puedan dañar la superficie de las barras.
- El corte de las barras, únicamente cuando sea necesario, debe realizarse con un cortador de rectificado de alta velocidad o sierra de hoja fina, siempre se ha de garantizar que los extremos cortados no se hayan dañado. Sin embargo, las barras de FRP no deben ser cortadas, ya que se pueden dañar las fibras y se favorece la infiltración de agentes externos en las barras. Las barras deben estar prefabricadas de taller según la longitud y la forma necesaria (el proceso de pultrusión de las barras garantiza formas de dimensiones precisas), no obstante, las barras de acero se suministran en grandes longitudes y se cortan en obra según la medida requerida para la ejecución de la estructura diseñada.

### 3.2.2. Colocación y ensamblaje de materiales

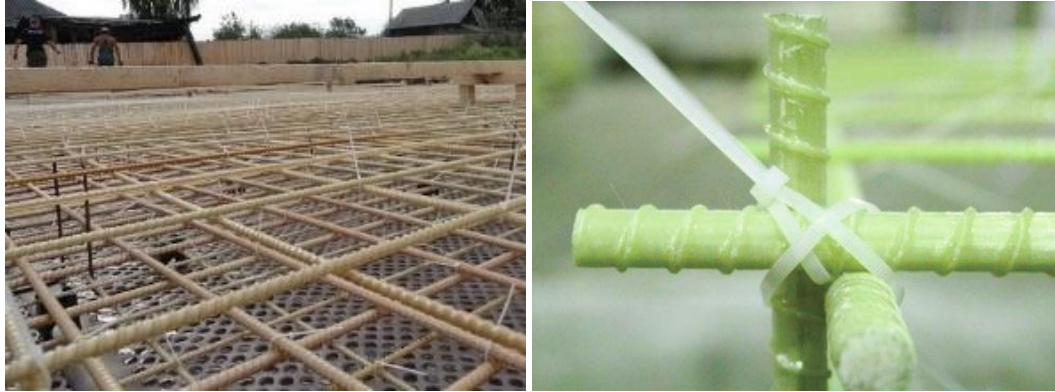
El hecho de que las barras de GFRP sean materiales ligeros que se producen en taller y se ensamblan en el lugar de ejecución de la estructura utilizando equipos livianos, hace que se reduzca el coste de producción en términos de instalación y transporte. En general, la colocación de los redondos de GFRP es parecida a la de las barras tradicionales de acero, sin embargo, este tipo de barras deben aplicarse con algunas excepciones:

- Los separadores (Fig. 16.) empleados en las estructuras con GFRP serán de un tipo y material consistente con el uso previsto de refuerzo, con propiedades no corrosivas ni magnéticas.



**Fig. 16.** Separadores con propiedades no corrosivas ni magnéticas.

- El refuerzo de GFRP debe asegurarse para evitar el desplazamiento en el vertido del hormigón. Para el atado de las armaduras, en lugar de utilizar alambres de acero como en las estructuras de barras de acero, se deben utilizar elementos no corrosivos, como las bridas de plástico o de nylon (Fig. 17).



**Fig. 17.** Atado de armado de GFRP mediante bridas de plástico.

## 4. ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON ARMADO DE GFRP

---

## 4. Análisis de estructuras con armado de GFRP

Cada vez es más habitual la utilización de las armaduras de FRP para reforzar el hormigón en las construcciones sujetas a acciones en ambientes agresivos como: los anclajes del terreno, las estructuras aislantes y permeables a ondas electromagnéticas, las plataformas marinas, los depósitos, armado de túneles y de puentes, etc., en ambientes donde el hormigón reforzado con barras tradicionales de acero presenta algunos inconvenientes (Almerich Chulia, A. I. 2010).

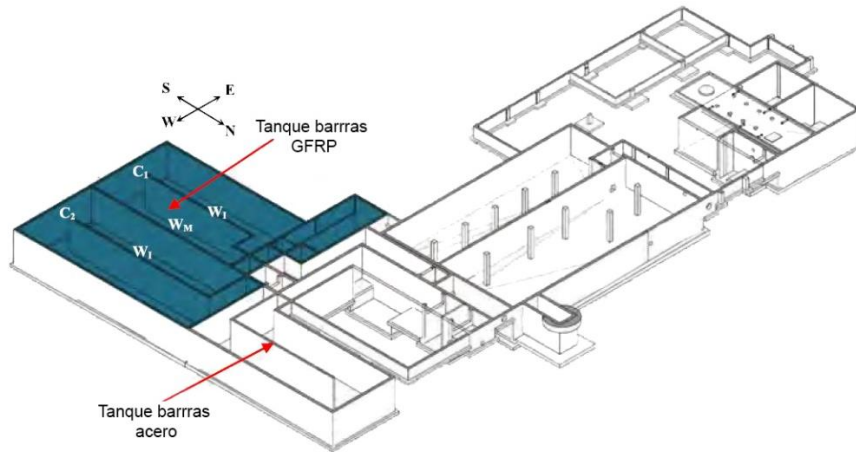
En este capítulo se presenta el análisis de diferentes estructuras proyectadas con hormigón armado con barras de GFRP y las razones por las que ha sido elegido este tipo de refuerzo para los elementos de hormigón armado.

### 4.1. Estudio de caso 1: Diseño y construcción de tanque de tratamiento de agua

Los tanques de hormigón armado con acero en una planta de tratamiento de aguas y agua residual experimentan graves problemas de corrosión debido a la aplicación de métodos de tratamiento o productos químicos. El diseño de estos tanques de agua requiere prestar atención no solo a los requisitos de resistencia, sino también a la durabilidad y al control de las grietas con el fin de impedir las fugas de agua y la corrosión del acero, por lo que este diseño requiere una mayor proporción de refuerzo, espesor de pared y hormigón de alta calidad.

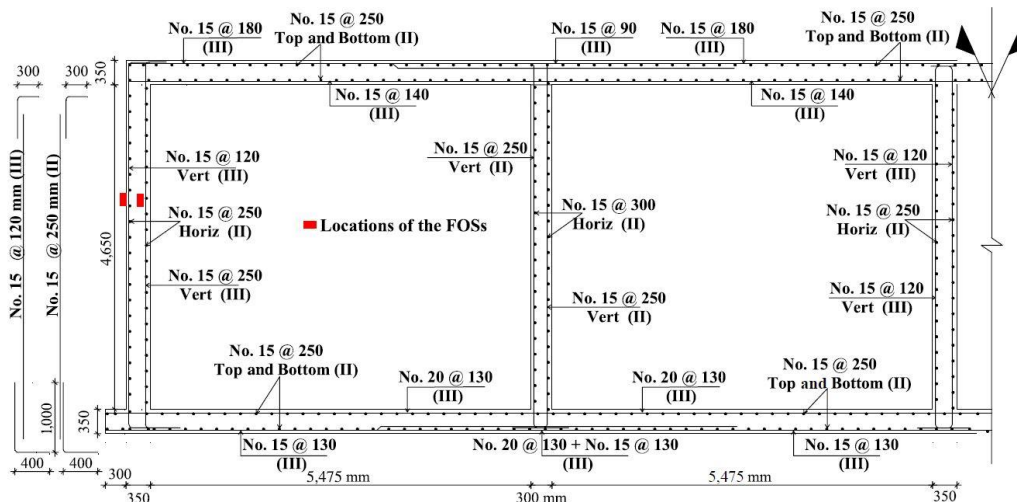
El proyecto se encuentra en las minas de Thetford, Quebec, Canadá. El tanque de agua tiene un volumen de más de 2.500 m<sup>3</sup> y sus paredes tienen una altura de 4.650 mm. Los cimientos, los muros verticales y la losa de cubierta fueron totalmente realizados con armado de barras de GFRP. El tanque se diseñó para satisfacer los criterios de utilidad y resistencia de las normas ACI 440. 1R-06, CAN / CSA S806 y ACI 350 / 350R - 06.

El propietario de la planta de agua, Thetford Mines, decidió utilizar las barras de refuerzo de GFRP en el tanque de cloración de agua (Fig. 18.), ya que el cloro es uno de los principales oxidantes en el tratamiento químico (aparte del oxígeno) durante los tratamientos del agua, con el fin de prolongar la vida útil, reducir los futuros costes de mantenimiento, evitar el problema de la corrosión y mejorar la eficiencia de costes del ciclo de vida de la nueva planta.



**Fig. 18.** Volumetría del conjunto. Planta de tratamiento de agua.

El tanque de agua se ha diseñado en base a la capacidad de servicio de los estados límites para los requisitos de los refuerzos con FRP, mientras que los espesores han sido diseñados utilizando la tensión de trabajo, como recomienda la ACI 350. En la figura 19 se muestra una sección donde se puede observar los espesores de los cimientos, muros y losas del tanque de agua que han sido determinados basándose en los principios de diseño de estructuras con FRP habituales, ignorando la resistencia a tracción del hormigón en los esfuerzos a flexión. Estos elementos se diseñan con un espesor de 350 mm y se comprueba que la tensión de tracción en la cara de retención de agua no excediese a la resistencia a tracción permisible del hormigón.



**Fig. 19.** Detalles del refuerzo de barras de GFRP para la sección vertical del tanque.

El tamaño de las barras de GFRP con el fin de controlar el agrietamiento, se utiliza un mayor número de redondos de diámetro inferior en lugar de menos barras de diámetro superior (ACI 350). Más barras con una separación reducida son más eficaces frente al agrietamiento, por ello, el tanque de agua se proyecta con barras de  $\varnothing 15$  mm con separaciones de 90-180 mm (Fig. 19.).

Como se observa en las imágenes 20, 21 y 22, las prácticas de construcción e instalación necesarias para la utilización de las barras de GFRP como refuerzo de los elementos de hormigón, son semejantes a las utilizadas con armadura de acero, teniendo en cuenta las diferencias en la manipulación y almacenamiento y en la colocación y ensamblaje mencionadas en el capítulo anterior.



**Fig. 20.** Refuerzo de los cimientos mediante barras de GFRP.



**Fig. 21.** Encofrado de los refuerzos verticales de barras de GFRP



**Fig. 22.** Hormigonado de la losa general de cubierta.

Gracias a la aplicación de la armadura de GFRP en los elementos de hormigón armado como refuerzo, se ha investigado que en las plantas de tratamiento de agua se puede extender la vida útil de la estructura a cien años o más en comparación con los tanques realizados con estructuras tradicionales de hormigón armado con acero, ya que estos últimos requieren de una restauración importante después de los 25 años por el efecto de la corrosión.

#### 4.2. Estudio de caso 2: Diseño y construcción de losas del aparcamiento de La Chancelière

Los garajes de aparcamiento se encuentran entre las estructuras de hormigón que sufren corrosión y deterioro debido a la humedad que penetra en el hormigón y a la exposición de las sales minerales del deshielo, haciendo que las barras se oxiden.

El aparcamiento de La Chancelière, situado en Quebec (Canadá), es una estructura de hormigón armado con acero bajo un edificio de varios pisos, como muestra la figura 23. El garaje tiene 3.160 m<sup>2</sup>. Recientemente, el aparcamiento mostró a los 40 años de antigüedad un gran deterioro como resultado de la corrosión de la armadura de acero como se muestra en la figura 24.



**Fig. 23.** Edificio residencial sobre el aparcamiento de La Chancelière



**Fig. 24.** Detalle de la corrosión de la armadura de acero.

Se decidió reemplazar las losas completas del primer nivel conservando los elementos de apoyo estructural, como las columnas y los muros de contención. Para las nuevas losas se utilizaron barras de refuerzo de GFRP con el fin de eliminar el efecto de la corrosión y conseguir una estructura libre de mantenimiento y con una vida útil más larga.

El espesor total de las nuevas losas reforzadas con GFRP (367 mm) se mantuvo al de las losas iniciales para preservar la altura libre de planta en el aparcamiento. El sistema estructural de las losas fue diseñado de acuerdo con la normativa de CAN/CSA S806-12 y en base a la capacidad de servicio de los estados límites para los requisitos de los refuerzos con FRP para satisfacer los criterios de utilidad y resistencia del aparcamiento.





**Fig. 25.** Demolición de la losa antigua para colocación de nuevo armado.

Las prácticas de construcción e instalación de las barras de GFRP necesarias son similares a las utilizadas con las barras de acero. Una vez demolida la losa con estructura tradicional de hormigón armado de acero (Fig. 25.), se prepara el encofrado y se instala la armadura de barras de GFRP (Fig. 26) siguiendo el diseño frente a los estados últimos para el que ha sido calculado y siguiendo las recomendaciones de las normas de diseño con FRP, con las diferencias durante la manipulación, almacenamiento y colocación de las barras.

Para lograr la continuidad de la losa con los elementos de soporte estructural existentes (pilares y muros de contención) se ejecutan los anclajes de las barras de GFRP mediante unas perforaciones en los elementos estructurales y las fijaciones de la armadura se realizan con el uso de un adhesivo. (Fig. 27).



**Fig. 26.** Colocación del armado de refuerzo de GFRP.



**Fig. 27.** Anclaje de las barras de GFRP en elementos estructurales.

El análisis de los costes del proyecto afirmó que el coste inicial más elevado de las armaduras de GFRP comparada con las barras de acero no era un coste más elevado del total de la estructura, el coste fue incluso menor debido a la sustitución de la capa asfáltica y la de poliuretano gracias al diseño con barras de GFRP. Además, el tiempo de construcción estimado con la solución de los redondos de GFRP era menor al de las barras de acero, por lo que gracias a este proyecto se confirma que se pueden conseguir diseños rentables con este tipo de armado.

### 4.3. Estudio de caso 3: Diseño y construcción del puente de Sainte-Catherine.

Debido a las duras condiciones ambientales y el exceso de sales minerales de deshielo en el invierno, la mayoría de los puentes de hormigón armado con estructura tradicional reforzada con barras de acero presentan corrosión de la armadura y el consiguiente deterioro del hormigón. Los costes de las reparaciones han impulsado el uso de las barras de polímeros reforzados con fibra, como las barras de GFRP.

Los puentes gemelos de Sainte-Catherine se encuentran en Sherbrooke, Quebec (Canadá), presenta una estructura de losa sobre viga 43,415 m. Las placas de cubierta de hormigón de 200 mm de espesor son continuas en cuatro vanos de 2,65 m con un voladizo medio de 1,0 m (ver en el esquema de planta, Fig. 28.). Recientemente, los puentes gemelos presentaron problemas de corrosión en las losas de hormigón, por lo que se decidió sustituir el armado tradicional de acero por unas losas de refuerzo híbrido, la estera superior compuesta por barras de polímeros reforzados con fibras de vidrio (GFRP) y la inferior con barras de acero galvanizado.

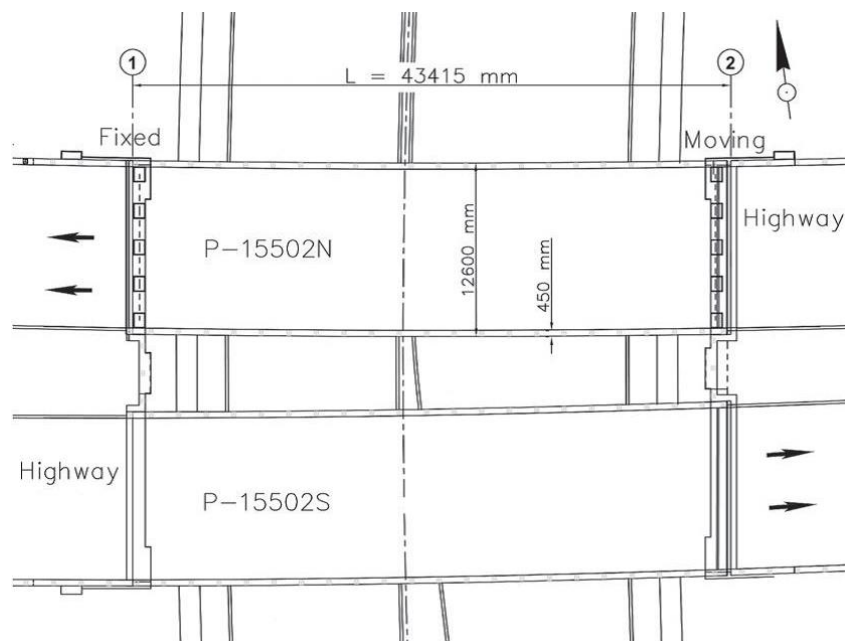


Fig. 28. Planta puentes gemelos de Sainte-Catherine.

Esta estructura de armado híbrida (Fig. 29.), se diseñó como solución óptima para evitar los efectos de la corrosión, ya que la estera de refuerzo superior es la que está más próxima a la superficie del hormigón y, por consiguiente, es la más susceptible a la exposición de los cloruros y productos químicos que aceleran el efecto de la corrosión en la armadura.



**Fig. 29.** Armado híbrido losas. Acero galvanizado en la cara inferior y GFRP en la superior.

Las losas del tablero de los dos puentes se diseñaron de acuerdo con el método de diseño a flexión de CSA (2006) y siguiendo las recomendaciones de diseño de los sistemas estructurales reforzados con barras de FRP. Para su construcción, se empleó un hormigón con una resistencia a compresión de 35 MPa y barras de GFRP con resina de viniléster y acabado de chorro de arena de  $\varnothing 20$  mm.

Como se puede observar en las imágenes 30 y 31, las prácticas de construcción e instalación de las barras de GFRP necesarias son parecidas a las utilizadas con las de acero, teniendo en cuenta las recomendaciones de las normas de diseño con barras de FRP en la manipulación, almacenamiento y disposición del armado.



**Fig. 30.** Armado de refuerzo híbrido con barras de GFRP y acero galvanizado.



**Fig. 31.** Hormigonado de la losa híbrida del puente de Sainte-Catherine.

Las pruebas realizadas en las investigaciones confirman que el comportamiento de los tableros de los puentes de hormigón con armados híbridos, es similar al de los puentes totalmente reforzados con armado de FRP. Por lo que este tipo de soluciones se convierte en una de las soluciones más viables y económicas para cumplir con los objetivos de servicio y resistencia para los que ha sido diseñado. Aumentando la vida útil y facilitando la construcción gracias al uso de las barras de GFRP, que evitan el efecto de la corrosión y son de peso más ligero.

## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS ESTRUCTURAS DE GFRP

---

## 5. Análisis económico de las estructuras de GFRP

En este apartado se desarrolla por una parte el coste de las barras de GFRP y por otra el coste que supone la ejecución de las estructuras, teniendo en cuenta como referencia las desventajas y las ventajas del uso del armado de fibra de vidrio como refuerzo del hormigón. También se realiza una comparación con la armadura tradicional de acero corrugado, con la finalidad de analizar qué tipo de estructura resulta más económica tanto al inicio de la construcción como a largo plazo.

En relación con el coste de fabricación de las barras reforzadas de fibra de vidrio, al ser sus materias primas de fácil acceso y la ejecución es menos compleja que el resto de las fibras de FRP (carbón y aramida) por lo que la fabricación y los precios son más asequibles que las de CFRP y AFRP.

Además, las fibras de vidrio son un material deformable, por lo que no se requiere una mano de obra especialmente cualificada para su ejecución. Por otra parte el factor económico se encuentra muy vinculado al comportamiento mecánico de las estructuras, suponiendo un factor relevante en su determinación, la relación peso/resistencia. Tal y como se ha desarrollado en los capítulos anteriores el comportamiento mecánico y las resistencias de las barras de GFRP, se encuentran por encima de las propiedades de las barras tradicionales de acero, siempre que no sean tratados mediante procedimientos especiales.

Diámetro barras	Acero	GFRP
Ø 6 mm	0,24	0,60
Ø 8 mm	0,43	0,90
Ø 10 mm	0,67	1,50
Ø 12 mm	0,97	2,20

**Tabla 12.** Precio de venta de barras corrugadas según diámetro (€/m).

Cuando se comparan los costes de las armaduras de fibra de vidrio con las de acero se puede establecer la diferencia en el coste inicial. Sin embargo, hay muchas razones por las que las barras de fibra de vidrio terminan siendo más asequibles que las barras de acero tradicionales.

A pesar de que el precio de las barras corrugadas de GFRP sea más elevado que el de las barras de acero, se necesita una cantidad inferior de redondos de refuerzo de GFRP y de un menor diámetro de estas, ya que poseen mejores propiedades mecánicas y mayor resistencia, por lo que su precio de la estructura en su conjunto se reduce. Otra ventaja es que el peso de las barras de GFRP es inferior al de las de acero, por lo que maquinaria pesada no es requerida para el transporte y manipulación, y a inferior peso, el coste total del material se reduce.

Las barras de acero son susceptibles a la corrosión y oxidación cuando se exponen a agentes exteriores agresivos. A medida que las barras de acero se corroen, se hinchan y comienzan a agrietarse y a desgastarse, creando aberturas que conducen a un mayor y más rápido deterioro del hormigón y del acero. Esto causa reparaciones y mantenimientos costosos y comprometen la integridad de la estructura. En cambio, la estabilidad dimensional de las barras de GFRP es alta y tienen una resistencia frente a la corrosión buena, por lo tanto, el aumento de coste en la fase de producción y venta hace que se reduzca al mínimo los futuros costes por mantenimiento.

Propiedades	GFRP	Acero
Resistencia a tracción (MPa)	500 - 850	483 - 690
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,58	7,85
Coef. Expansión térmica (x10 <sup>-6</sup> /°C)	Longitudinal	11
	Transversal	11
Resistencia a la corrosión	Buena	Corrosivo
Precio (€/Kg)	5,00	0,81

**Tabla 13.** Comparación de las propiedades de las barras de GFRP, acero y acero inoxidable.

Actualmente el coste de producción de las barras de GFRP es todavía elevado, por lo que el uso se limita únicamente en los usos en los cuales, las propiedades de este tipo de barras son las más adecuadas para satisfacer ciertas necesidades en contrato. Un incremento del uso de este tipo de barras en la construcción provocaría una disminución del coste de fabricación, por lo que la utilización de las armaduras de GFRP se expandiría (Almerich Chuia. Ana I. 2010).

## 6. CONCLUSIONES

---

## 6. Conclusiones

Las principales conclusiones que se pueden obtener del presente Trabajo de Fin de Grado atendiendo a las investigaciones y los análisis comparativos entre las barras de GFRP y las de acero son:

1. Las armaduras de GFRP tienen una buena resistencia frente al efecto de la corrosión, por lo que las propiedades de las barras no se ven alteradas y la vida útil de estas estructuras se prolonga, en cambio, las barras de acero sí que son susceptibles a este efecto y se deterioran, reduciendo la vida útil tanto de la armadura como del hormigón.
2. Las barras reforzadas con fibra de vidrio resisten a una tensión de tracción de hasta 2 veces superior a las de acero corrugadas, sin embargo, el módulo elástico de las armaduras de GFRP es en torno a un 20% menor que las tradicionales de acero.
3. La ejecución de las estructuras con barras de GFRP es similar a la ejecución con redondos de acero. Sin embargo, hay que tener en cuenta algunas diferencias en la manipulación, almacenamiento y en la colocación de las barras.
4. El coste de fabricación de las barras de GFRP es superior que el de las barras de acero, por lo que se puede establecer la diferencia en el coste inicial de las barras, en torno a 4 veces más.
5. Las barras de GFRP al poseer mejores propiedades mecánicas y mayor resistencia se requieren de una menor cantidad de barras por lo que el conjunto de la estructura puede resultar igual o más económica que las realizadas con barras de acero.
6. Las barras de GFRP, al contrario que los redondos tradicionales de acero, no requieren mantenimiento por el efecto de la corrosión, por lo que la vida útil es más larga y los costes de futuras reparaciones se reducen.





## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Almerich Chulia, A. I. (2010). *“Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP”*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [2] ACI 440.1R-15. (2015) *“Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars”*, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- [3] ACI 440.6M-08. (2009). *“Specification for Carbon and Glass Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement”*. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- [4] A. Ahmed, E., Benmokrane, B., & Sansfaçon, M. (2016). *“Case Study: Design, Construction, and Performance of the La Chancelière Parking Garage’s Concrete Flat Slabs Reinforced with GFRP Bars”*. American Society of Civil Engineers
- [5] A. Ahmed, E., Settecasì, F., & Benmokrane, B. (2014). *“Construction and Testing of GFRP Steel Hybrid-Reinforced Concrete Bridge-Deck Slabs of Sainte-Catherine Overpass Bridges”*. American Society of Civil Engineers.
- [6] A. Hadhood et al. (2017). *“Efficiency of glass-fiber reinforced-polymer (GFRP) discrete hoops and bars in concrete columns under combined axial and flexural loads”*, Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Quebec, Canada.
- [7] Bakis, C.E. (1993) *“FRP reinforcement: materials and manufacturing. Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for concrete structures. Properties and applications”*. Elsevier Science Publishers.
- [8] Bank LC, Gentry T R. (1995). *“Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behaviour of FRP Composite Structures: Environmental Effects”*, Journal of Reinforced Plastic and Composites, Vol. 14.
- [9] Benmokrane, B. et al. (2000). *“Use of fibre reinforced polymer reinforcement integrated with fibre optic sensors for concrete bridge deck slab construction”*. Canadian Journal Civil Engineering 27(5), pp. 928-940.
- [10] Benmokrane, B.; Challal. O. (1993) *“Physical and mechanical performance of an innovative glass-fiber-reinforced plastic rod for concrete and grouted anchorages”*. Canadian Journal Civil Engineering v.20, pp 254-268.

- [11] Calvet Rodríguez, V. (2014). *“Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón”*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [12] CAN/CSA S806-02 (2002) *“Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers”*. Canada Standards Association, Canada.
- [13] Cos-Gayón López, F. (2017). *“Influencia de elevadas temperaturas en la adherencia de las barras de fibra de carbón con el hormigón”*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [14] CNR-DT 203/2006. (2007) *“Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymers bars”*. Advisory committee on technical recommendations for construction.
- [15] Cosenza E. et al. (1997, Mayo). *“Behaviour and Modelling of Bond of FRP Rebars to Concrete”*. Journal of Composites for Construction.
- [16] Ehasni, M. R. (1993) *“Glass-fibre reinforcing bars”*. Alternative materials for the reinforcement and prestressing of concrete, ed. J.L. Clarke, Blackie Academic and Professional, London.
- [17] Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., and Tao, S.: " Bond behavior of deformed GFRP bars." Journal of Composite Materials, V. 31, No. 14 (1997b)., pp. 1413-1430.
- [18] EHE-08 (2008) *“Instrucción de hormigón estructural”*. Comisión permanente del hormigón, Madrid. Ministerio de Fomento.
- [19] FIB Bulletin 40. Task Group 9.3. (2007). *“FRP reinforcement in RC structures”*. Lausanne, Switzerland: Federation Internationale de Beton Task Group 9.3.
- [20] GangaRao, H.V.S.; Taly, N.; Vijay, P.V. (2007) *“Reinforced concrete design with FRP composites”*. Ed. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton, Florida, USA.
- [21] GangaRao, H.V.S.; Vijay, P.V. (1997) *“Design of concrete members with GFRP bars”*. Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Symposium, Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures, v.1, pp 143-150.
- [22] Hamdy M. M., y Benmokrane, B. (2013). *“Design and Performance of Reinforced Concrete Water Chlorination Tank Totally Reinforced with GFRP Bars: Case Study”*. American Society of Civil Engineers.

- [23] Hernandez Caneiro, J. A. (2015). "La seguridad en el diseño estructural con el empleo de barras de PRF como refuerzo del hormigón". Universidad Tecnológica de la Habana.
- [24] JSCE 1997. (1997). "*Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforcing materials*". Research Committee on Continuous Fibre Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo.
- [25] Kato, Y., Nishimura, T., Uomoto, T., and Yamaguchi, T.: "*The effect of ultraviolet rays to FRP rods*", Proc. CDCC '98, Benmokrane, B. and Rahman, H. (Eds.), Sherbrooke, Québec, Canada, August 5–7, (1998).
- [26] Lawrence, C. B. (2006). "*Composites for construction: structural design with FRP materials*". John Wiley & Sons, INC., Hoboken, New Jersey, USA.
- [27] Mallick, K. (1998). "*Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing and Design*". Marcel Dekker Inc., New York.
- [28] McCormac, J. C., & Nelson, J. K. (2006). "*Design of reinforced concrete*". (Seventh Edition ed.). ACI 318-05 Code Edition.
- [29] Parkyn, B. (1985). "*Glass reinforced plastics*", In: Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, 2nd Ed., London: CRC Press, 1970; New York: John Wiley & Sons.
- [30] Quayyum, S. (2010). "Bond behaviour fibre reinforced polymer (FRP) rebars in concrete". Universidad de British Columbia.
- [31] Rao, R.M.G.K., Balasubramanian, N., and Chanda, M. (1981). "*Factors affecting moisture absorption in polymer composites*", Part-II, Influence of External Factors, Environment Effects on Composite Materials, vol. III, Springer, G. (Ed.), Lancaster, PA: Technomic Publishing Company.
- [32] Sheard P, Clarke JL, Dill M, Hammersley G and Richardson D. (1997) "EUROCRETE – Taking Account of Durability for Design of FRP Reinforced Concrete Structures". Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proc. 3rd Int. Symp., Vol 2.

## BIBLIOGRAFÍA TABLAS

**Tabla 1.** Elaboración propia.

**Tabla 2.** Adaptación de Almerich Chulia, Ana. I. 2010. *“Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP”*. Universidad Politécnica de Valencia.

**Tabla 3.** Adaptación de JSCE 1997. (1997). *“Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials”*. Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Tokyo.

**Tabla 4.** Adaptación de FIB Bulletin 40. Task Group 9.3. (2007). *“FRP reinforcement in RC structures”*. Lausanne, Switzerland: Federation Internationale de Beton Task Group 9.3.

**Tabla 5.** Adaptación de GangaRao, H.V.S.; Taly, N.; Vijay, P.V. (2007) *“Reinforced concrete design with FRP composites”*. Ed. CRC Press, Taylor & Francis Group.

**Tabla 6.** Adaptación de ACI 440.1R-15. (2015) *“Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars”*, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

**Tabla 7.** Adaptación de FIB Bulletin 40. Task Group 9.3. (2007). *“FRP reinforcement in RC structures”*. Lausanne, Switzerland: Federation Internationale de Beton Task Group 9.3.

**Tabla 8.** Adaptación de FIB Bulletin 40. Task Group 9.3. (2007). *“FRP reinforcement in RC structures”*. Lausanne, Switzerland: Federation Internationale de Beton Task Group 9.3.

**Tabla 9.** Adaptación de EHE-08 (2008) *“Instrucción de hormigón estructural”*. Comisión permanente del hormigón, Madrid. Ministerio de Fomento.

**Tabla 10.** Adaptación de ACI 440.1R-15. (2015) *“Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars”*, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.

**Tabla 11.** Adaptación de Almerich Chulia, Ana. I. 2010. *“Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP”*. Universidad Politécnica de Valencia.

**Tabla 12.** Elaboración propia. Información facilitada fabricantes.

**Tabla 13.** Elaboración propia.

## BIBLIOGRAFÍA FIGURAS

**Figura 1.** Fuente: <http://mguadagnini.staff.shef.ac.uk/frp/frp.php>

**Figura 2.** Fuente: [https://www.researchgate.net/figure/Different-types-of-commercially-available-FRP-rebar\\_fig1\\_277868457](https://www.researchgate.net/figure/Different-types-of-commercially-available-FRP-rebar_fig1_277868457)

**Figura 3.** GangaRao, H.V.S.; Taly, N.; Vijay, P.V. (2007) *“Reinforced concrete design with FRP composites”*. Ed. CRC Press, Taylor & Francis Group.

**Figura 4.** Almerich Chulia, Ana I. 2010. *“Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP”*. Universidad Politécnica de Valencia. / Strongwell Corporation, Bristol, VA

**Figura 5.** Fuente: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/07/pultrusion.html>

**Figura 6.** Adaptación de Quayyum, S. (2010). *“Bond behaviour fibre reinforced polymer (FRP) rebars in concrete”*. Universidad de British Columbia.

**Figura 7.** FIB Bulletin 40. Task Group 9.3. (2007). *“FRP reinforcement in RC structures”*. Lausanne, Switzerland: Federation Internationale de Beton Task Group 9.3.

**Figura 8.** Calvet Rodríguez, V. (2014). *“Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón”*. Universidad Politécnica de Valencia.

**Figura 9.** Calvet Rodríguez, V. (2014). *“Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón”*. Universidad Politécnica de Valencia. Adaptación de Peters 1998.

**Figura 10.** Adaptación de Almerich Chulia, Ana I. 2010. *“Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP”*. Universidad Politécnica de Valencia.

**Figura 11.** Adaptación de GangaRao, H.V.S.; Taly, N.; Vijay, P.V. (2007) *“Reinforced concrete design with FRP composites”*. Ed. CRC Press, Taylor & Francis Group.

**Figura 12.** Calvet Rodríguez, V. (2014). *“Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón”*. Universidad Politécnica de Valencia.

**Figura 13.** Adaptación de McCormac, J. C., & Nelson, J. K. (2006). *“Design of reinforced concrete”*. (Seventh Edition ed.). ACI 318-05 Code Edition.

**Figura 14.** Calvet Rodríguez, V. (2014). *“Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón”*. Universidad Politécnica de Valencia. Adaptación de Balázs y Borosnyói. 2002.

**Figura 15.** A. Abdalla, H., & El-Badry, M. (1999). *“Thermal Compatibility of Composites in Concrete Beam”*. Montreal, Quebec, Canada

**Figura 16.** Fuente: <https://www.cymper.com/blog/separadores-de-hormigon-segun-la-norma-ehe-08/>

**Figura 17.** Fuente: <https://www.tatran-group.com/materia%C5%82y/pr%C4%99ty-kompozytowe>

**Figura 18.** Adaptación de Hamdy M. M., y Benmokrane, B. (2013). *“Design and Performance of Reinforced Concrete Water Chlorination Tank Totally Reinforced with GFRP Bars: Case Study”*. American Society of Civil Engineers.

**Figura 19.** Hamdy M. M., y Benmokrane, B. (2013). *“Design and Performance of Reinforced Concrete Water Chlorination Tank Totally Reinforced with GFRP Bars: Case Study”*. American Society of Civil Engineers.

**Figura 20.** Hamdy M. M., y Benmokrane, B. (2013). *“Design and Performance of Reinforced Concrete Water Chlorination Tank Totally Reinforced with GFRP Bars: Case Study”*. American Society of Civil Engineers.

**Figura 21.** Hamdy M. M., y Benmokrane, B. (2013). *“Design and Performance of Reinforced Concrete Water Chlorination Tank Totally Reinforced with GFRP Bars: Case Study”*. American Society of Civil Engineers.

**Figura 22.** Hamdy M. M., y Benmokrane, B. (2013). *“Design and Performance of Reinforced Concrete Water Chlorination Tank Totally Reinforced with GFRP Bars: Case Study”*. American Society of Civil Engineers.



**Figura 23.** Fuente: <http://www.ems-ing.com/en/achievements/building/58-1-reconstruction-of-the-la-chanceliere-parking-garage.html>

**Figura 24.** A. Ahmed, E., Benmokrane, B., & Sansfaçon, M. (2016). *“Case Study: Design, Construction, and Performance of the La Chancelière Parking Garage’s Concrete Flat Slabs Reinforced with GFRP Bars”*. American Society of Civil Engineers

**Figura 25.** Fuente: <http://www.ems-ing.com/en/achievements/building/58-1-reconstruction-of-the-la-chanceliere-parking-garage.html>

**Figura 26.** Fuente: <http://www.ems-ing.com/en/achievements/building/58-1-reconstruction-of-the-la-chanceliere-parking-garage.html>

**Figura 27.** A. Ahmed, E., Benmokrane, B., & Sansfaçon, M. (2016). *“Case Study: Design, Construction, and Performance of the La Chancelière Parking Garage’s Concrete Flat Slabs Reinforced with GFRP Bars”*. American Society of Civil Engineers

**Figura 28.** A. Ahmed, E., Settecası, F., & Benmokrane, B. (2014). *“Construction and Testing of GFRP Steel Hybrid-Reinforced Concrete Bridge-Deck Slabs of Sainte-Catherine Overpass Bridges”*. American Society of Civil Engineers.

**Figura 29.** A. Ahmed, E., Settecası, F., & Benmokrane, B. (2014). *“Construction and Testing of GFRP Steel Hybrid-Reinforced Concrete Bridge-Deck Slabs of Sainte-Catherine Overpass Bridges”*. American Society of Civil Engineers.

**Figura 30.** A. Ahmed, E., Settecası, F., & Benmokrane, B. (2014). *“Construction and Testing of GFRP Steel Hybrid-Reinforced Concrete Bridge-Deck Slabs of Sainte-Catherine Overpass Bridges”*. American Society of Civil Engineers.

**Figura 31.** A. Ahmed, E., Settecası, F., & Benmokrane, B. (2014). *“Construction and Testing of GFRP Steel Hybrid-Reinforced Concrete Bridge-Deck Slabs of Sainte-Catherine Overpass Bridges”*. American Society of Civil Engineers.

