

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Fundamentos de la Arquitectura  
Curso 2019\_2020

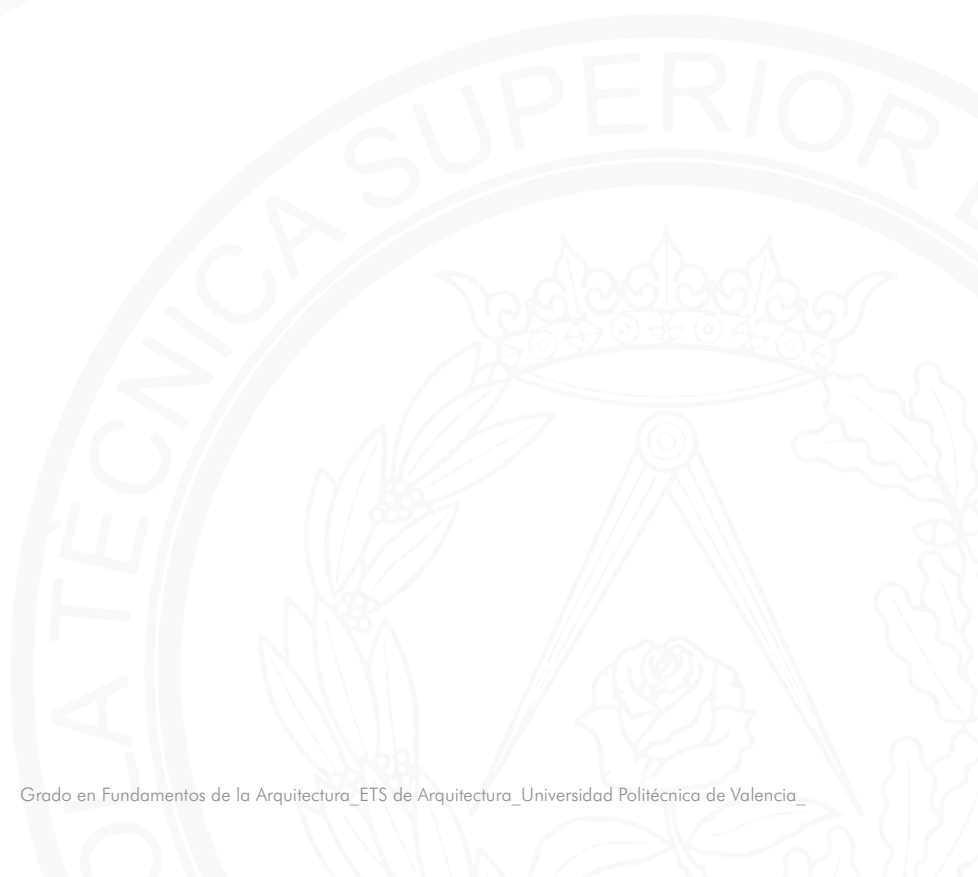
# Estudio de la corrosión en edificios de la costa Mediterránea

Universidad Politécnica de Valencia  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura



Tutor\_Víctor Calvet Rodríguez  
Alumno\_Óscar Cortines Aroca







## RESUMEN

El problema más frecuente en cuanto a causa de patología y probablemente la de mayor impacto económico que presenta el acero en armados de hormigones estructurales, es la corrosión de la armaduras. Este problema se hace mucho más frecuente en zonas costeras como lo es todo el frente mediterráneo, con los grandes niveles de humedad ambiental existentes. Pese a todo esto, los materiales estructurales utilizados deberán garantizar el cumplimiento para la vida útil de la construcción.

Este trabajo cogerá como punto de partida los armados en estructuras con hormigones armados con finalidades estructurales, sobre todo, el conformado por barras corrugadas de acero por ser el utilizado con más frecuencia. De la mano de los avances tecnológicos que van apareciendo con el tiempo, se han ido descubriendo nuevos materiales que pueden sustituir al acero para los armados, como lo son las barras reforzadas con fibra de carbono (CFRP). Este material presenta grandes características muy adecuadas para muchas situaciones, las cuales, estudiaremos con el objetivo de tener buenas y fiables alternativas al acero y poder llegar a sustituirlo en muchas de las ocasiones en las que este, sea muy desfavorable, por ejemplo, por el entorno.

Se comparará con diversidad de estudios las barras de acero con las reforzadas con fibra de carbono, para demostrar la valía estructural que ocupa el primer citado y dictar si las segundas serían un buen sustituto para mejorar el rendimiento estructural en ambientes que favorezcan la corrosión del acero.

## PALABRAS CLAVE

Barras de acero, barras de fibra de carbono, hormigón, CFRP, matriz polimérica, polímeros, corrosión, óxido, resinas, adherencia, resistencias, armado.

## ABSTRACT

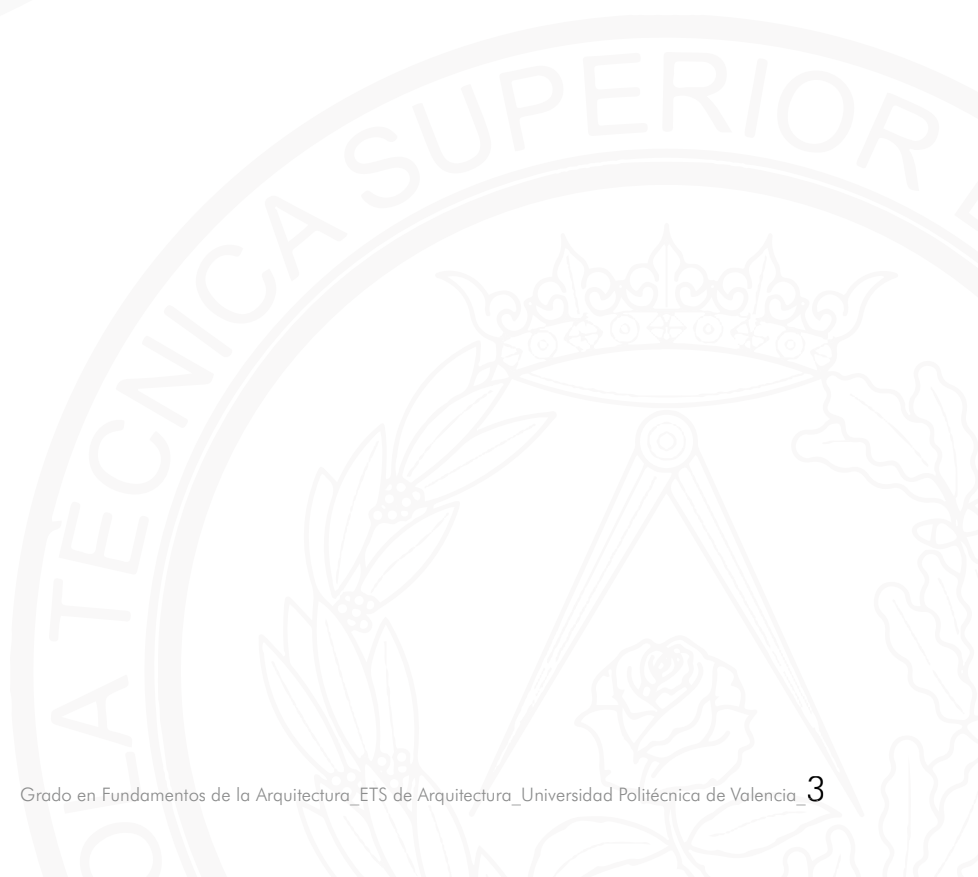
The most frequent problem in terms of pathology and probably the one with the greatest economic impact that steel presents in structural concrete reinforcements, is the corrosion of the reinforcements. This problem becomes much more frequent in coastal areas such as the entire Mediterranean front, with the high levels of existing humidity. Despite all this, the necessary materials must guarantee compliance for the useful life of the construction.

This work will take as a starting point the reinforcement in structures with reinforced concrete for structural purposes, above all, the one formed by corrugated steel bars to be used more frequently. Hand in hand with the technological advances that appear over time, new materials have been discovered that can replace steel for reinforcement, such as carbon fiber reinforced bars (CFRP). This material has great characteristics that are very suitable for many situations, which we will study in order to have good and reliable alternatives to steel and to be able to replace it on many of the occasions in which it is very unfavorable, for example, due to the environment.

The steel bars will be compared with those reinforced with carbon fiber through a variety of studies, in order to demonstrate the structural value of the former and to determine whether the latter includes a good substitute for improving structural performance in environments that favor steel corrosion. .

## KEY WORDS

Steel bars, carbon fiber bars, concrete, CFRP, polymer matrix, polymers, corrosion, rust, resins, adhesion, resistance, reinforcement,







## ÍNDICE

RESUMEN_PALABRASCLAVE.....	1
ABSTRACT_KEYWORDS.....	2
ÍNDICE.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	9
ÍNDICE DE FIGURAS.....	13
INTRODUCCIÓN.....	17
OBJETIVOS Y METODOLOGÍA.....	18
CAPÍTULO 1_Agentes intervinientes de estructuras conformadas en hormigón armado...21	
1.1_Hormigón.....	21
1.1.1_Cemento.....	21
1.1.2_Áridos.....	21
1.1.3_Agua.....	22
1.1.4_Adiciones.....	23
1.1.5_Aditivos.....	23
1.2_Armado.....	23
1.2.1_Armados de barras de Acero.....	24
1.2.2_Armados de barras de Polímeros Reforzados con Fibras (CFRP).....	25
1.2.2.1_Composición.....	25
1.2.2.1.1_Matrices Poliméricas.....	25
1.2.2.1.1.1_Resinas Termoestables.....	26
1.2.2.1.1.2_Resinas Termoplásticas.....	27
1.2.2.1.2_Fibras de Carbono.....	31
1.2.2.1.3_Proceso de Fabricación.....	32
1.2.2.2_Tipos de Barras de CFRP.....	32
1.2.2.2.1_Grados de Resistencia y Módulo.....	33
1.2.2.2.2_Geometría Superficial.....	33
1.2.2.2.3_Diámetro de las Barras.....	33
1.2.2.2.4_Identificación de las Barras.....	35
CAPÍTULO 2_Propiedades y Coste de los armados de Acero y CFRP en estructuras de hormigón armado.....	39
2.1_Propiedades físicas.....	39
2.1.1_Densidad.....	39

2.1.2_Coeficiente de Dilatación Térmica.....	40
2.1.3_Conductividad Eléctrica.....	40
2.2_Propiedades mecánicas.....	41
2.2.1_Tracción.....	41
2.2.2_Compresión .....	42
2.2.3_Cortante.....	44
2.3_Durabilidad.....	45
2.3.1_Efecto del Agua.....	45
2.3.2_Efecto de los Cloruros.....	46
2.3.3_Efececto de los Álcalis.....	46
2.3.4_Efecto de la Radiación Ultravioleta.....	47
2.3.5_Efecto de la Carbonatación del Hormigón.....	48
2.3.6_Efecto de la Temperatura.....	48
2.4_Adherencia hormigón con su armado.....	51
2.4.1_Factores influyentes en la adherencia.....	51
2.4.1.1_Hormigón.....	51
2.4.1.2_Armadura.....	51
2.4.1.3_Diseño.....	52
2.4.1.4_Proceso de fabricación.....	53
2.4.1.5_Temperatura.....	53
2.4.2_Adherencia hormigón-barras de Acero.....	53
2.4.3_Adherencia hormigón-barras de CFRP.....	54
3.4.3.1_Barras lisas.....	54
3.4.3.2_Barras corrugadas o con algún tipo de tratamiento superficial.....	55
2.5_Coste barras CFRP vs Coste barras de Acero.....	57
2.6_Aspectos Medioambientales.....	57
2.7_Aspectos Sociales.....	60
CAPÍTULO 3_Caso de Estudio de Construcción en la Costa Mediterránea con problemas de Corrosión en armaduras de acero.....	63
3.1_Aspectos generales de la construcción estudiada.....	63
3.2_Pruebas técnicas de la construcción estudiada.....	66
3.2.1_Ultrasonidos.....	66
3.2.2_Probetas testigo.....	67
3.2.3_Evaluación de resultados de las pruebas.....	67
3.3_Presupuesto ejecución material para la adecuación de la estructura dañada.....	70

CAPÍTULO 4_Caso ejemplo de construcciones conformadas en hormigón armado con elementos de fibra de carbono.....	73
4.1_Kings Stormwater Channel Bridge.....	73
4.2_West Mille Bridge.....	75
4.3_The CUBE.....	76
CAPÍTULO 5_Conclusiones principales.....	79
BIBLIOGRAFÍA.....	82
BIBLIOGRAFÍA DE TABLAS.....	87
BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS.....	91

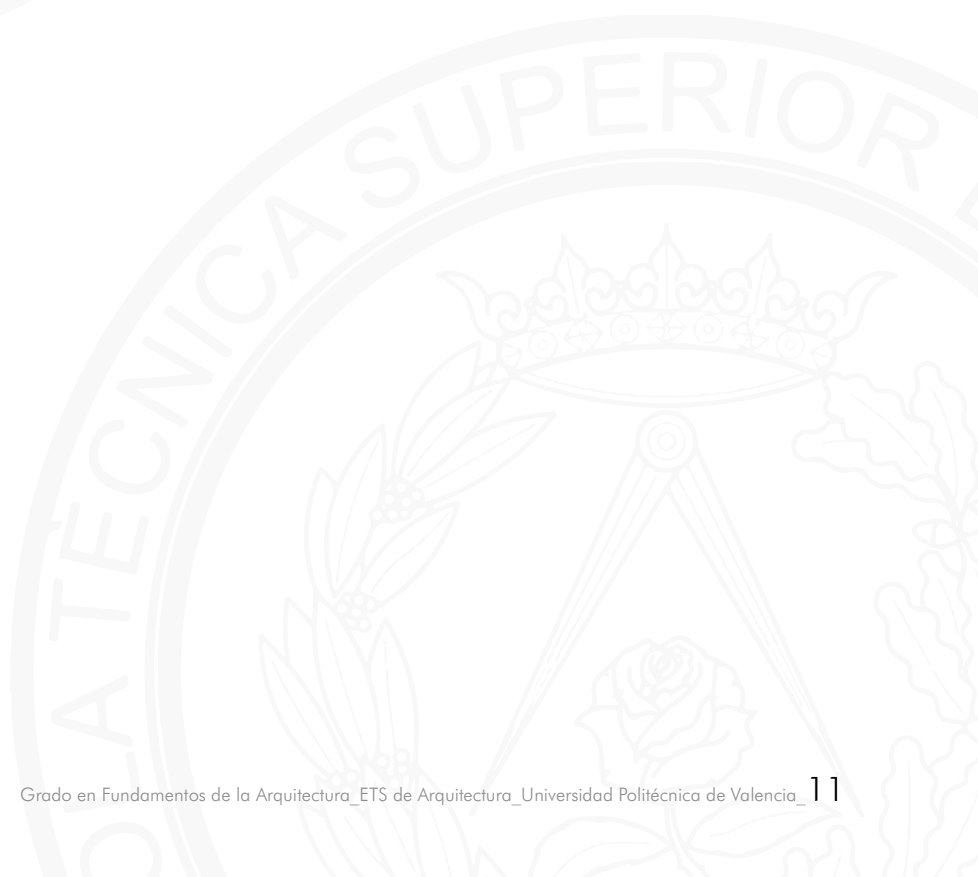


## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> _Tipos de cementos comunes y componentes.....	22
<b>Tabla 1.2</b> _Recubrimientos mínimos de barras.....	24
<b>Tabla 1.3</b> _Propiedades de las diferentes resinas termoplásticas.....	27
<b>Tabla 1.4</b> _Propiedades mecánicas de las resinas PEEK.....	27
<b>Tabla 1.5</b> _Propiedades de las resinas epoxi.....	29
<b>Tabla 1.6</b> _Propiedades de las resinas de poliéster.....	30
<b>Tabla 1.7</b> _Resistencia a tracción y módulo elástico mínimo de las barras de CFRP.....	33
<b>Tabla 1.8</b> _Diámetros de las barras de CFRP que contempla la <i>ACI 440.1R-06</i> .....	35
<b>Tabla 2.1</b> _Densidades de las barras de CFRP y Acero.....	39
<b>Tabla 2.2</b> _CTE de barras de CFRP, Acero y hormigón.....	40
<b>Tabla 2.3</b> _Propiedades mecánicas de las barras de CFRP y acero a tracción.....	42
<b>Tabla 2.4</b> _Comportamiento a tracción de las barras de CFRP, ambientes sin exposición ambiental vs ambientes alcalinos.....	46
<b>Tabla 2.5</b> _Comportamiento a cortante transversal de las barras de CFRP, ambientes sin exposición ambiental vs ambientes alcalinos.....	47
<b>Tabla 2.6</b> _Reducción de resistencia a tracción de las barras de CFRP en presencia de ambientes alcalinos.....	47
<b>Tabla 2.7</b> _Datos de los ensayos de resistencia a tracción a diferentes rangos de temperaturas den barras de CFRP.....	49
<b>Tabla 2.8</b> _Tensiones de adherencia de las barras corrugadas o con algún tipo de tratamiento superficial.....	55
<b>Tabla 2.9</b> _Mecanismos para la adherencia de las barras corrugadas o con algún tipo de tratamiento superficial.....	56
<b>Tabla 2.10</b> _Propiedades y Costes de las barras de CFRP y Acero.....	57
<b>Tabla 2.11</b> _Precios de diferentes refuerzos extraídos del generador de precios de la construcción de Cype Ingenieros.....	58
<b>Tabla 2.12</b> _Energía primaria para la extracción de los diferentes tipos de materiales y la adicional para la fabricación de los elementos compuestos.....	59
<b>Tabla 2.13</b> _Estudio comparativo entre los refuerzos de CFRP y acero.....	60

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1</b>	_Resultados pruebas por ultrasonidos en los diferentes ensayos.....	66
<b>Tabla 3.2</b>	_Resultados pruebas por probetas testigo.....	67
<b>Tabla 3.3</b>	_Evaluación pruebas por ultrasonidos en los diferentes ensayos.....	68
<b>Tabla 3.4</b>	_Resultados de las probetas testigo ensayadas.....	69







# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> _Tipos de aditivos.....	23
<b>Figura 1.2</b> _Uso de aditivos.....	23
<b>Figura 1.3</b> _Deformación de viga conformada en hormigón armado.....	24
<b>Figura 1.4</b> _Tipos de barras según sus corrugas.....	25
<b>Figura 1.5</b> _Ejemplo de estructura con barras de polímeros reforzados con fibras.....	26
<b>Figura 1.6</b> _Estructura 3d de las resinas epoxi.....	28
<b>Figura 1.7</b> _Estructura química de las resinas epoxi.....	28
<b>Figura 1.8</b> _Estructura química de la resina de poliéster.....	30
<b>Figura 1.9</b> _Estructura atómica de las fibras de carbono.....	31
<b>Figura 1.10</b> _Proceso de pultrusión.....	32
<b>Figura 1.11</b> _Variedad de geometrías de barras de CFRP.....	34
<b>Figura 1.12</b> _Variedad de geometrías superficiales de barras de CFRP.....	34
<b>Figura 1.13</b> _Identificación de las barras de CFRP.....	36
<b>Figura 2.1</b> _Ejes de las barras de CFRP.....	40
<b>Figura 2.2</b> _Comportamiento de las fibras de carbono tensión/deformación, de la matriz polimérica y de la barra de CFRP.....	41
<b>Figura 2.3</b> _Comportamiento de las barras de CFRP tensión/deformación y acero.....	41
<b>Figura 2.4</b> _Distribución de las tensiones normales en la sección transversal de una barra de CFRP.....	42
<b>Figura 2.5</b> _Influencia del ángulo de la tensión aplicada en la rigidez de las barras de CFRP.....	43
<b>Figura 2.6</b> _Modos de rotura de las barras de CFRP en función del ángulo de la tensión aplicada.....	43
<b>Figura 2.7</b> _Influencia del porcentaje del volumen total de las barras de CFRP de fibra de carbono en su resistencia.....	44
<b>Figura 2.8</b> _Tensión de corte transversal ( $\tau_3$ ) aplicada a una barra de CFRP.....	44
<b>Figura 2.9</b> _Ensayos de resistencia a tracción sometidas a diferentes temperaturas en barras de CFRP..	48
<b>Figura 2.10</b> _Comportamiento mecánico de la exposición a diferentes temperaturas de las barras de CFRP, GFRP y acero.....	50

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.11</b> _Comparación de comportamientos mecánicos a) R. Tracción, b) Módulo elástico frente a diferentes temperaturas en barras de CFRP, GFRP y acero.....	50
<b>Figura 2.12</b> _Geometría de una barra corrugada.....	52
<b>Figura 2.13</b> _Tensión de adherencia en función a la dirección del vertido a) Vertido paralelo al armado, b) Vertido perpendicular al armado.....	53
<b>Figura 2.14</b> _Adherencia Hormigón-Acero.....	53
<b>Figura 2.15</b> _Esquema según geometría superficial de las barras de CFRP.....	54
<b>Figura 2.16</b> _Gráfica de la tensión adherente/desplazamiento barra lisa de CFRP-hormigón.....	54
<b>Figura 2.17</b> _Relación tensión adherente/deslizamiento de los diferentes barras de CFRP y hormigón....	55
<b>Figura 2.18</b> _Relación tensión adherente/deslizamiento entre barras corrugadas de CFRP-hormigón.....	55
<b>Figura 2.19</b> _Comportamiento de la adhesión barra CFRP-hormigón.....	56
<b>Figura 3.1</b> _Plantas caso estudiado. Izquierda Planta Baja. Derecha Planta Primera/Tipo.....	63
<b>Figura 3.2</b> _Spalling del recubrimiento mecánico de las armaduras de acero en forjado.....	64
<b>Figura 3.3</b> _Spalling del recubrimiento mecánico de las armaduras de acero en forjado.....	64
<b>Figura 3.4</b> _Corrosión y pérdida de sección en armaduras de acero de los pilares.....	65
<b>Figura 3.5</b> _Corrosión y pérdida de sección en armaduras de acero de los pilares.....	65
<b>Figura 3.6</b> _Corrosión y pérdida de sección en armaduras de acero de los pilares.....	65
<b>Figura 3.7</b> _Resistencia característica mínima compatible con requisitos de durabilidad.....	68
<b>Figura 3.8</b> _Estado de pilares.....	69
<b>Figura 3.9</b> _Estado de pilares.....	69
<b>Figura 3.10</b> _PEM para la adecuación de la estructura estudiada.....	70
<b>Figura 4.1</b> _Diferentes vistas del Kings Stormwater Channel Bridge.....	73
<b>Figura 4.2</b> _Imágenes de la construcción del Kings Stormwater Channel Bridge.....	73
<b>Figura 4.3</b> _Planta del Kings Stormwater Channel Bridge.....	74
<b>Figura 4.4</b> _Sección longitudinal del Kings Stormwater Channel Bridge.....	74
<b>Figura 4.5</b> _Sección transversal del Kings Stormwater Channel Bridge.....	74

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 4.6</b> _Conexión viga-tablero y viga-pilar.....	75
<b>Figura 4.7</b> _Sección transversal del West Mille Bridge.....	75
<b>Figura 4.8</b> _Imágenes infográficas del West Mille Bridge.....	75
<b>Figura 4.9</b> _Imágenes del West Mille Bridge.....	76
<b>Figura 4.10</b> _Emplazamiento de “the CUBE”.....	76
<b>Figura 4.11</b> _Maqueta proyecto “the CUBE”.....	76
<b>Figura 4.12</b> _Idea de la cubierta “the CUBE”.....	76
<b>Figura 4.13</b> _Proyecto “the CUBE”.....	76



# INTRODUCCIÓN

El acero es el material utilizado para el refuerzo de hormigones armados con destino estructural y entre los diferentes problemas que puede presentar, la corrosión de este, es un problema muy grave en edificaciones situadas en zonas costeras, con grandes reducciones de resistencia por disminución de secciones de armado, por el elevadísimo coste de mantenimiento que supone a medio y largo plazo y los grandes costes medioambientales y sociales que tiene este sistema constructivo.

Allá por los años 70, aparecen los denominados materiales compuestos avanzados, los cuales, están formados de polímeros reforzados con fibras o FRP (fibre reinforced polymer).

Se va a analizar un tipo de FRP como lo son los polímeros reforzados con fibra de carbono o CFRP (carbon fibre reinforced polymer). Este material soluciona los problemas de corrosión totalmente, ya que, no es un material metálico, posee mejores propiedades resistentes y son más ligeros que el acero.

Los materiales comentados se utilizan mayoritariamente en el sector civil de la construcción, como por ejemplo en puentes, ya que son elementos situados en ambientes de alta humedad por su cercanía al agua y lugares con ciclos de hielo/deshielo. En este tipo de construcciones civiles se lleva demostrando la gran valía de este material, en construcción de viviendas se está utilizando como refuerzo a posteriori, en estructuras con patologías.

Hay muchísimos estudios sobre la determinación del comportamiento de las barras de CFRP para armados de hormigón. Las buenas propiedades mecánicas, físicas, de durabilidad y reducción final de costes económicos hacen que sea el sustituto ideal del acero.

Por todo esto, se decide estudiar el material compuesto avanzado CFRP en barras, comparándolo con el acero, ya que supondría una gran evolución en el sector de la construcción de viviendas en zonas costeras.

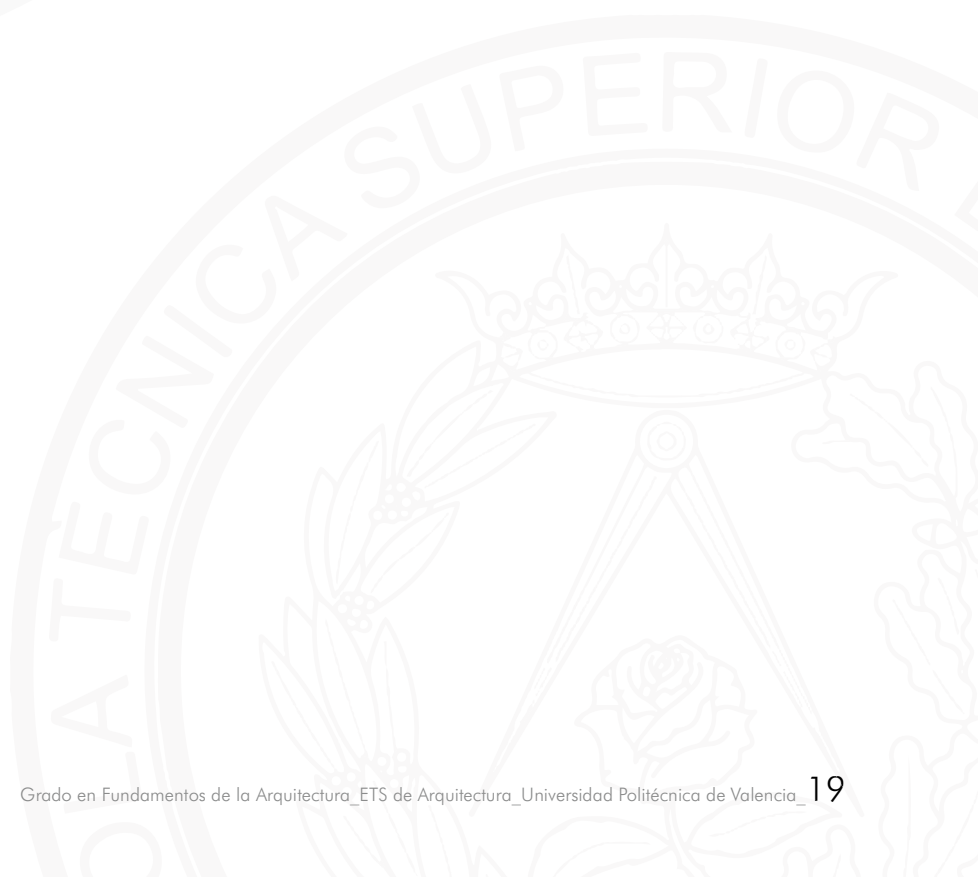
## OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo será el de en un primer momento, analizar las propiedades y características de los armados de acero y CFRP en estructuras de hormigón armado con destino estructural comparándolas entre sí, para determinar si el CFRP sería un buen sustituto del acero en edificaciones costeras con grandes problemas de corrosión.

## METODOLOGÍA

Para la realización del trabajo, se estudiarán los componentes que conforman el hormigón y su armado, analizando el comportamiento que presenta el acero en sus armados para posteriormente analizar los componentes y propiedades de las barras de CFRP.

Se estudiará un caso de una edificación situada en al costa mediterránea con sus problemas de corrosión, para acabar con casos de construcciones conformadas en hormigón armado con CFRP.







# CAPÍTULO 1

## Agentes básicos intervinientes de las estructuras conformadas en hormigón armado

En el capítulo se mencionarán y analizarán los materiales que conforman las estructuras de hormigón armado. El estudio tendrá como finalidad, sacar unas comparaciones teóricas y prácticas entre los armados de la tipología estructural anteriormente nombrada, centrándose en el actual punto en la composición de redondos y refuerzos.

### 1.1 Hormigón

Este pétreo artificial, es el principal componente de las estructuras analizadas, proporcionando a estas la mayor parte de la resistencia a compresión. La resistencia dependerá de los grados de compactación que este tenga, definiéndose por la ductilidad.

El hormigón se compone por distintos elementos, como lo son el cemento, agua, áridos finos y gruesos (arena y grava), obteniéndose finalmente por endurecimiento del cemento por su reacción con el agua de amasado. Dependiendo de la proporción de sus compuestos poseerá unas características u otras, siendo un material muy versátil al adaptarse a las necesidades de cada edificación y su situación, ganando gran importancia su dosificación. Normalmente para un producto de mayor calidad, la mezcla de los hormigones estructurales se realizan en centrales, donde serán vertidos los distintos elementos en una amasadora hasta que se obtenga un producto homogéneo.

#### 1.1.1 Cemento

El cemento es material inorgánico que se muele y al ser mezclado con agua reacciona químicamente, siendo capaz de endurecer bajo el agua, es decir, un conglomerante hidráulico. La consecuencia de los procesos de hidratación es la formación de una pasta que fragua y endurece, que al finalizar estos procesos, mantiene su resistencia y estabilidad, incluso bajo el agua.

Su compuesto principal será el sílice (óxido de silicio), alúmina (óxido de aluminio) y cal (óxido de calcio). Muchas veces se añaden otros materiales en menores proporciones para aumentar la cantidad de algún óxido ante su falta, denominados correctores.

Además de variar la proporción de los diferentes compuestos principales, se pueden incorporar al clinker portland diferentes adiciones, principalmente escoria siderúrgica (S), cenizas volantes silíceas (V), cenizas volantes calcáreas (W), puzolanas naturales (P), puzolanas naturales calcinadas (Q), humo de sílice (D), esquisto calcinado (T) y filleres calizos (L y LL), para ayudar en el proceso de fabricación y/o proporcionar ciertas características al cemento, siendo como máximo su dosificación puede ser la del 5% en masa.

Las diferentes dosificaciones de los elementos darán lugar a distintos tipos de cementos. A continuación, en la **Tabla 1.1** se observa los distintos tipos de cementos comunes.

#### 1.1.2 Áridos

Los áridos componen de forma principal el hormigón, siendo partículas de diferentes tamaños y naturaleza (gravas y arenas), ocupando aproximadamente el 80% del volumen total del hormigón.

La adherencia de estos con el cemento se dará por la porosidad y su absorción, de las cuales dependerá la resistencia mecánica y su durabilidad final. La *EHE-08* fija que según las normas *UNE 83.133* y *UNE 83.123* los áridos tienen que absorber como máximo un 5% de agua.

Tipo de cemento	Denominación	Designación	Clinker K	Escoria de Hornos altos S	Humo de Sílice D	Puzolanas Naturales P	Cenizas Volantes V	Caliza L	Componentes Minoritarios Adiciones (2)
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	—	—	—	—	—	0-5
CEM II	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	—	—	—	—	0-5 0-5
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	—	6-10	—	—	—	0-5
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P CEM II/B-P	80-94 65-79	—	—	6-20 21-35	—	—	0-5 0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-V CEM II/B-V	80-94 65-79	—	—	—	6-20 21-35	—	0-5 0-5
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L	80-94	—	—	—	—	6-20	0-5
	Cemento Portland Mixto (3).	CEM II/A-M CEM II/B-M	80-94 65-79	—	—	6-20 21-35	(4) (5) (4) (5) (6)	—	—
	CEM III	Cemento de horno Alto	CEM III/A CEM III/B	35-64 20-34	36-65 66-80	—	—	—	—
CEM IV	Cemento Puzolánico	CEM IV/A CEM IV/B	65-89 45-64	—	—	11-35 (4) 36-55 (4)	—	—	0-5 0-5
CEM V	Cemento Compuesto	CEM V/A	40-64	18-30	—	18-	30	—	0-5

- (1) Los valores de la tabla se refieren al núcleo de cemento, entendiéndose por tal el "clínker" y las adiciones con exclusión del sulfato de calcio (regulador de fraguado) y de los aditivos.
- (2) Los componentes minoritarios adicionales pueden ser "filler", o uno o más de los componentes principales, a menos que están incluidos ya como tales en el cemento.
- (3) Cuando algún cemento portland, mixto, en razón de su composición, se pueda incluir en alguno de los tipos II anteriores, deberá llevar la denominación y designación correspondientes a dicho tipo.
- (4) La proporción de humo de sílice se limita al 10 por 100.
- (5) La proporción de "filler" se limita al 5 por 100.
- (6) La proporción de caliza se limita al 20 por 100.

**Tabla 1.1** \_Tipos de cementos comunes y componentes.

### 1.1.3\_Agua

El agua, tanto para amasado como para curado, no debería contener sustancias dañinas, limitándolas a cantidades que no contaminen y alteren las propiedades del hormigón o protección de armaduras frente a corrosión, como lo sería el agua potable.

\_Agua de amasado: Será el agua necesaria para que se produzcan las reacciones necesarias para el endurecimiento. Dependiendo de la cantidad de agua, la moldeabilidad del hormigón variará, pudiendo darse problemas de trabajabilidad si la proporción a/c es baja.

\_Agua de curado: Utilizada para equilibrar el agua evaporada a lo largo del fraguado. Se debe añadir abundante agua para alcanzar las resistencias pensadas en el hormigón.

### 1.1.4\_Adiciones

Elementos inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que varían las propiedades y características del hormigón, mejorando alguna de estas. No deberán afectar negativamente al hormigón final. Serán añadidos los compuestos en el momento de mezclado del hormigón, y los hay de dos tipos, cenizas volantes y humo de sílice.

### 1.1.5.\_Aditivos

Con naturaleza fisico-química, producen cambios en los comportamientos químicos, físicos y mecánicos. Se incorporarán a la mezcla antes del amasado, ocupando como máximo un 5% del peso total del cemento, los cambios se desarrollarán cuando esta endurezca.

Con un hormigón bueno de base, los aditivos podrán ayudar y suponer un plus a este. En cambio, si de base el material no es de adecuadas condiciones, no lo mejorará. Desde un principio, el hormigón debe cumplir unas especificaciones exigidas.

En las **Figuras 1.1 y 1.2** se diferencian tipos de aditivos y su uso.

Tipos de aditivos	
TIPO DE ADITIVO	FUNCIÓN PRINCIPAL
<b>Reductores de agua / Plastificantes</b>	Disminuir el contenido de agua de un hormigón para una misma trabajabilidad o aumentar la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
<b>Reductores de agua de alta actividad /Superplastificantes</b>	Disminuir significativamente el contenido de agua de un hormigón sin modificar la trabajabilidad o aumentar significativamente la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
<b>Modificadores de fraguado / Aceleradores, retardadores</b>	Modificar el tiempo de fraguado de un hormigón.
<b>Inclusores de aire</b>	Producir en el hormigón un volumen controlado de finas burbujas de aire, uniformemente repartidas, para mejorar su comportamiento frente a las heladas.
<b>Multifuncionales</b>	Modificar más de una de las funciones principales definidas con anterioridad.

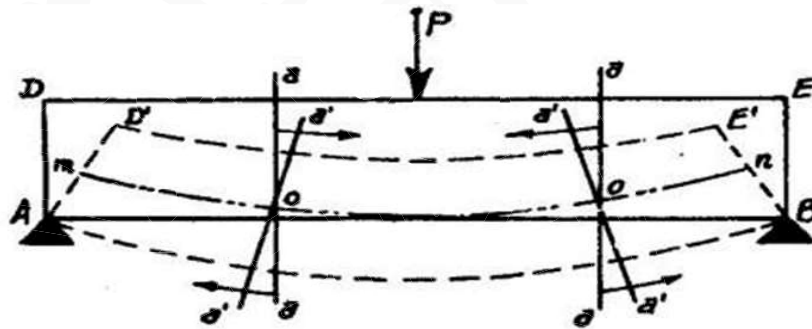
**Figura 1.1** \_Tipos de aditivos.

ADITIVOS	UTILIZACIÓN
<b>FLUIDIFICANTES</b>	Necesidad de una buena trabajabilidad. Prefabricación. Hormigones de alta resistencia.
<b>PLASTIFICANTES</b>	Transporte neumático del hormigón. Hormigón colocado bajo el agua. Bloques prefabricados. Arenas faltas de finos. Hormigón muy armado. Inyección.
<b>ACELERANTES</b>	Desencofrado rápido. Prefabricación en tiempo frío. Sellados. Reparaciones rápidas.
<b>RETARDANTES</b>	Tiempo cálido. Transporte a grandes distancias. Hormigón con árido visto. Continuaciones de hormigonado.
<b>AIREANTES ANTIGÉLIDOS</b>	Carreteras Obras expuestas al hielo.
<b>ANTICONGELANTES</b>	Hormigonado hasta $-10^{\circ}$ (tiempo muy frío). Bajo precauciones.
<b>HIDRÓFUGOS</b>	Morteros de enlucidos. Cisternas, depósitos... Trabajos subterráneos. Morteros de juntas.

**Figura 1.2** \_Uso de aditivos.

## 1.2\_Armado

En las estructuras de hormigón armado, las armaduras (redondos), son el elemento que aporta la mayor parte de la resistencia a tracción (es cierto que el hormigón posee una pequeña parte de esta resistencia).En la **Figura 1.3**, podremos analizar las cargas que resistiría cada elemento.



**Figura 1.3** \_Deformación de viga conformada en hormigón armado.

Basándonos en la **Figura 1.3**, Toda la zona inferior es en la que predomina el trabajo a tracción, la cual, deberá resistir los redondos, que son el elemento con mayor resistencia a dicha tensión, colocándolos en la zona inferior del interior de la pieza de hormigón siempre recubiertas con un espesor mínimo de hormigón (recubrimiento mecánico), medidas mínimas indicadas en la **Tabla 1.2**. La zona superior es mayoritaria de cargas a compresión, las cuales recibirá el hormigón.

Hormigón y elementos Barras y armaduras	Recubrimiento Mínimo mm	
	Condiciones Normales	Condiciones Severas
a) Hormigón colocado contra el suelo y permanentemente expuesto a él.	50	70
b) Hormigón expuesto al suelo o al aire libre.		
Barras $d_b$ 18 a $d_b$ 36	40	50
Barras $d_b$ 16 y menores	30	40
c) Hormigón no expuesto al aire libre ni en contacto con el suelo.		
• Losas, muros, nervaduras:		
Barras $d_b$ 16 a $d_b$ 36	20	20
Barras $d_b$ 12 y menores	15	20
• Vigas y columnas:		
Armadura principal	30	40
Amarras, estribos y zunchos	20	30
• Cáscaras y placas plegadas:		
Barras $d_b$ 18 y mayores	20	20
Barras $d_b$ 16 y menores	15	15
d) Elementos de confinamiento en albañilerías.		
Armadura principal $d_b$ 10 y menores	20	30
Amarras, estribos y zunchos $d_b$ 8 y menores	15	20

$d_b$  = Diámetro Nominal de la Barra.

**Tabla 1.2** \_Recubrimientos mínimos de barras.

### 1.2.1 \_Armados de barras de Acero

El material se empezó a emplear en 1740, cuando Benjamin Huntsman combinó en un crisol, hierro y carbón vegetal, lo calentó y creó un acero de alta calidad (*Revista ARQHYS, 2012*).

El acero es una aleación resultante de la mezcla de hierro con una parte de carbono, esta última le aportará la elasticidad final. El hierro es un metal alotrópico, es decir, que su estructura reticular dependerá en función de la temperatura (*Revista ARQHYS, 2012*).

Existe gran cantidad de tipos de acero, como lo es el acero al carbono, el cual contendrá entre un 0,1% a un 1,9% de carbono, el acero de baja aleación sería otro ejemplo, al cual, se le añaden varios metales para la mejora de alguna de sus propiedades.

El material estudiado, tiene interesantes propiedades, tanto físicas como mecánicas:

\_Gran resistencia a esfuerzos tanto de tracción como de compresión. Se podrán conocer los límites elásticos y esfuerzo a rotura mediante ensayos en laboratorio.

\_Alta elasticidad. Al deformarse por debajo de su límite elástico, recupera su forma original al retirar la carga.

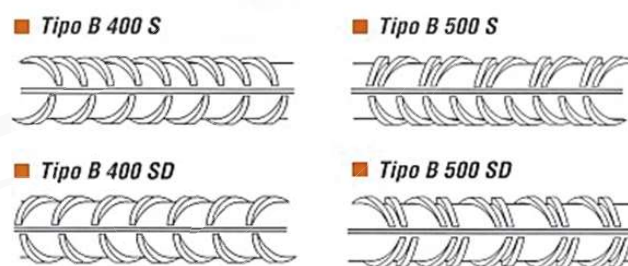
\_Se suelda de manera fácil a otra pieza metálica que pueda ser soldada, permitiendo crear grandes estructuras de manera adaptativa.

\_Se moldea fácilmente por su plasticidad, por lo que se puede adaptar muy bien a diferentes geometrías.

\_Al ser cortado o perforado, no pierde sus propiedades.

Pero también tiene partes negativas, como que es un transmisor de calor y electricidad, se puede oxidar en contacto con el aire o con el agua, llegando incluso a poder corroerse en caso de agua salada. Este último se puede resolver con una aleación de cromo, níquel y aluminio, dando lugar al acero inoxidable (*Revista ARQHYS, 2017*). Su densidad es muy grande si se compara con otros materiales destinados a refuerzos en estructuras conformadas en hormigón armado, siendo  $7,85 \text{ g/cm}^3$ .

Los redondos de acero empleados en estructuras de hormigón reforzado suele tener corrugas (mostrado en la **Figura 1.4**) en la superficie de las barras para aumentar la adherencia de estas con el hormigón y que puedan trabajar y deformarse conjuntamente, que es la base del funcionamiento del hormigón armado. Ya que el acero es un material resistente al desgaste, no se deteriora aun sometido a esfuerzos de rozamiento con el hormigón. El hormigón recubre al acero y lo protege de la oxidación.



**Figura 1.4** \_Tipos de barras según sus corrugas.

Este tipo de material se usa en la construcción por norma general como barras corrugadas, ya que en ciertos aspectos, los redondos de acero no cumplen ciertas exigencias necesarias para las estructuras necesarias y gracias a las propiedades de este tipo de refuerzos, podrían cumplir dichas exigencias.

Este tipo de barras aumentan por norma general, todas las propiedades que tiene el acero: aumento de resistencia a tracción, gran resistencia química y a la corrosión y un mejor control de la dilatación. (*J. Torres, 2018*).

## 1.2.2 \_Armados de barras de Polímeros Reforzados con Fibras (CFRP)

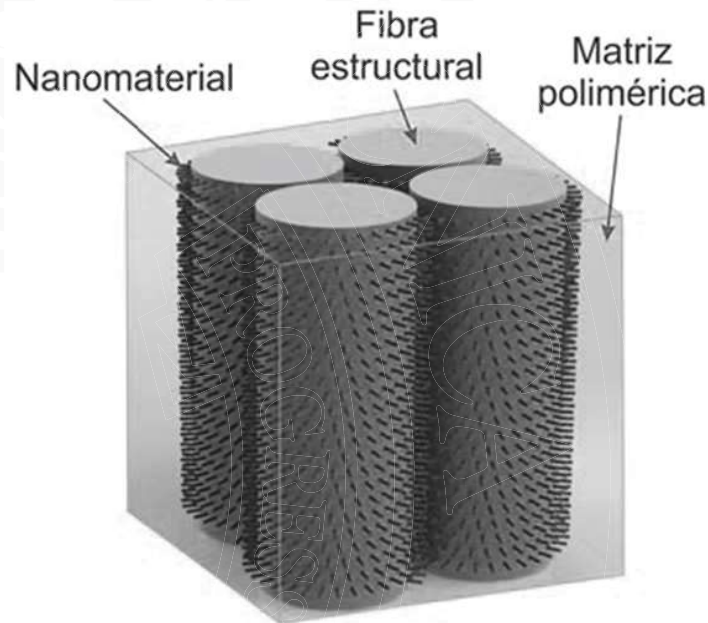
### 1.2.2.1 \_Composición

Se describirán más profundamente los elementos de los armados con CFRP, ya que, será la base de comparación del trabajo con el acero, material mucho más conocido y estudiado.

#### 1.2.2.1.1 \_Matrices poliméricas

Las matrices poliméricas son compuestos orgánicos con mucho peso molecular formado por carbono e hidrógeno (*V. Calvet, 2014*). Cuanto mayor es el peso molecular, mejores son sus propiedades mecánicas (*G. Morales, 2008*).

Estas matrices tienen las siguientes funciones (*C.E. da Costa*):



**Figura 1.5** \_Ejemplo de estructura con barras de polímeros reforzados con fibras.

\_Proteger las fibras, asegurando la permanencia de estas es sitio para que no cambien de dirección y protegerlas del ambiente externo.

\_Asegurar la unión de los diferentes elementos de la formación del refuerzo, manteniendo las fibras unidas, pero también alejarlas entre si para no propagar, en los casos en los que se den, las grietas en el momento del traslado de redondos o/y su manipulación.

\_Transferir y distribuir las cargas de la matriz polimérica a las fibras. Para que esto se posible, la matriz no debe tener un módulo de elasticidad muy alto.

Las resinas, para poder cumplir su función, deberán cumplir unos requerimientos (*J. M. García*):

\_Ser dúctiles.

\_Estar dotadas de un módulo de elasticidad menor al de las fibras.

\_El volumen de la resina deberá estar comprendida en la horquilla del 30% al 60% del volumen total.

Se pueden distinguir dos tipos de resinas, termoplásticas y termoestables.

#### 1.2.2.1.1.1 \_Resinas Termoestables

Estas se encuentran en estado sólido, pasando a líquido sometidas a temperaturas que superen su punto de fusión, volviendo a su primer estado al reducir la temperatura nombrada, recuperando las propiedades originales (*A. Paz, 2017*).

Al no estar unida su estructura molecular por enlaces químicos, y estarlo por enlaces secundarios con menos fuerza, sus moléculas tienen libre movimiento al ser sometidas a altas temperaturas y presión.

Aun pudiendo repetirse el ciclo, ya que el primer estado sólido no es definitivo, el material se va debilitando cada vez que es sometido a este proceso, reduciendo las propiedades mecánicas, pero dotándole de mayor dureza, aumentando su resistencia al impacto y captación de humedad (*V. Calvet, 2014*).

A parte, habrá que tener especial cuidado durante su proceso de impregnación para el correcto contacto entre las fibras y resinas. Estas resinas al calentarse, tienen una muy alta viscosidad, siendo difíciles de procesar (*fib bulletin 40, 2007*).

En la siguiente **Tabla 1.3** \_Propiedades de las diferentes resinas termoplásticas, se enumerarán las características más importantes.

RESINAS	PROPIEDADES
<b>Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)</b>	- Resistencia al calor - Tenacidad
<b>Policloruro de vinilo (PVC)</b>	- Resistencia y rigidez - Baja tenacidad - Buena resistencia a ácidos
<b>Policarbonados (PC)</b>	- Cristalino - Buenas propiedades mecánicas
<b>Polietileno (PE)</b>	- Resistencia a agentes químicos - Buenas propiedades mecánicas - Aislante eléctrico - Muy blando
<b>Polipropileno (PP)</b>	- Resistencia a agentes químicos - Buenas propiedades mecánicas - Aislante eléctrico
<b>Polisulfona (PSU)</b>	- Gran deformación al fallo - Gran estabilidad a altas temperaturas y humedades
<b>Polieter eter cetona (PEEK)</b>	- Alto rendimiento - Gran tenacidad - Absorción de agua baja

**Tabla 1.3** Propiedades de las diferentes resinas termoplásticas.

De las nombradas en la **Tabla 1.3**, las más utilizadas serían las PEEK. Son semicristalinas, con grandes propiedades tanto químicas como mecánicas, a cualquier temperatura. Aguantan la degradación térmica y a ambientes exteriores. Su captación de agua (dicho en la tabla), en de un 0,5% de su peso a una temperatura de 23°C, es decir, baja (*Blog "Tecnología de los plásticos, 2011"*). En la siguiente **Tabla 1.4** se nombrarán algunas propiedades mecánicas de estas.

Propiedades mecánicas	
Resistencia a la compresión	118 MPa
Ductilidad	50% de alargamiento a la rotura
Coefficiente de fricción dinámica	0.25
Modulo de flexión	4,1 GPa
Resistencia a la flexión	170 MPa
Dureza	125 Rockwell R
Impacto Izod	85.4 J/m
Coefficiente de Poisson	0.39
Resistencia a la tracción	89.6 MPa
Modulo de Young	3.6 GPa
Modulo de corte	1.4 GPa
Resistencia al corte	52.4 MPa

**Tabla 1.4** Propiedades mecánicas de las resinas PEEK.

### 1.2.2.1.1.2\_ Resinas Termoplásticas

De forma amórfica, presentan una estructura molecular ramificada o entrecruzada. Varían dependiendo de la temperatura, siendo sus modificaciones irreversibles, tras haber sido curados, no pueden modificarse. Esto es así ya que, durante su curado las cadenas poliméricas reaccionan entre sí, junto a agentes catalizadores, generando macromoléculas. Estas van a todas las direcciones y están unidas por fuerzas covalentes. Endurecen por reacciones químicas generando una retícula tridimensional que le aporta al material ciertas propiedades mecánicas, térmicas y resistencias químicas muy elevadas.

Estas resinas tendrán las siguientes características (*F. A. Herrera*):

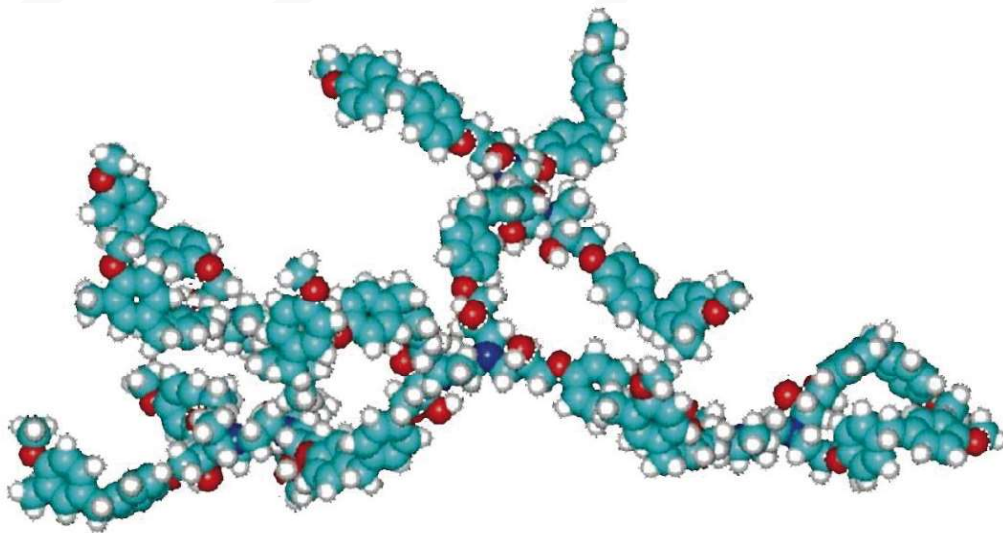
- Mayor rigidez que las resinas termoplásticas.
- Fragilidad por su ductilidad y su menor resistencia a impacto.
- Menos solubles.
- Al no modificar su forma, funcionan mejor a temperaturas altas.
- No es posible fundirla.
- No se puede reciclar, por enlaces no pueden variar su forma.

Las resinas termoestables más utilizadas son la epoxi, resina de poliéster y de vinil éster.

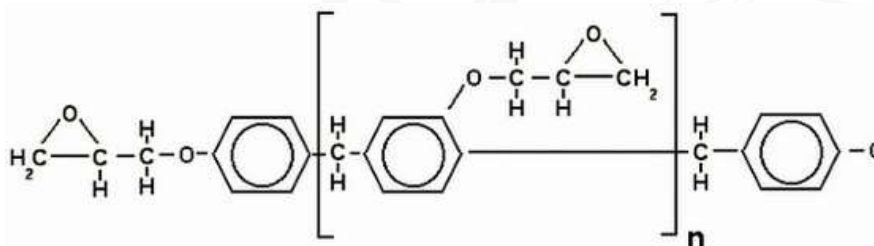
#### 1.2.2.1.1.2.1\_ Resinas Epoxi

Son de bajo peso molecular, con grupos epoxi. Estos, están formados por anillos de un oxígeno y dos carbonos.

Para endurecer estas resinas y curarlas, se añade un endurecedor como podría ser el DETA, en el cual, se desarrollan reacciones químicas con los grupos epoxi, creando una red tridimensional (**Figura 1.6**). Se muestra en la **Figura 1.7** la estructura química de las resinas epoxi.



**Figura 1.6**\_ Estructura 3d de las resinas epoxi.



**Figura 1.7**\_ Estructura química de las resinas epoxi.



Las propiedades de esta resina dependerán del tipo de catalizador utilizado para el curado, pudiendo en algunos casos, curarse a temperatura ambiente con diferentes endurecedores, y con otros, serán necesarias mayores temperaturas. Como norma, estas resinas, tras haber sido curadas, tendrán una alta resistencia, perdiendo poco volumen durante el curado, con gran adherencia a las fibras, alta resistencia química y baja toxicidad. Las propiedades se indican en la **Tabla 1.5**.

El tiempo de endurecimiento podrá llegar a superar las 24 horas a temperatura ambiente, pudiendo ser sometido posteriormente a un postcurado en lámparas de matriz epóxidas, para asegurar el total entrecruzamiento, es decir, para cerciorar su transición de estado líquido a sólido. (M. González, 2014).

Propiedades	Resina epoxi
<b>Densidad</b> (g/cm <sup>3</sup> )	1.17-1.25
<b>Alargamiento a la rotura</b> (%)	6-8
<b>Fluencia</b>	Muy buena
<b>Temperatura de moldeo</b> (°C)	Hasta 170
<b>Temperatura de reblandecimiento</b> (°C)	80-130
<b>Propiedades reológicas</b>	Muy buenas
<b>Calor de la reacción</b>	Depende de la geometría
<b>Contracción del fraguado</b> (%)	1-3
<b>Contracción posterior</b> (%)	Prácticamente nula
<b>Tiempo de almacenamiento</b>	6 meses

**Tabla 1.5** \_Propiedades de las resinas epoxi.

Las principales ventajas y desventajas se nombrarán a continuación (F. A. Herrera):

- Ventajas:

- \_ Buenas propiedades mecánicas y térmicas.
- \_ Elevada resistencia al agua.
- \_ Gran resistencia térmica.
- \_ Baja pérdida de volumen al curarse.

- Desventajas:

- \_ Gran coste.
- \_ Altos tiempos para el curado.

#### 1.2.2.1.1.2.2 \_Resinas de Poliéster.

En cuanto a materiales compuestos, son las resinas más utilizadas. Compuestas principalmente por dos elementos, poliéster insaturado y un disolvente como el estireno (M. González, 2014).

El estireno tiene dobles enlaces de carbono y es el compuesto que durante la polimerización hace que las



- Desventajas:

- \_ Para alcanzar las capacidades mecánicas requeridas, necesitará de un post-curado.
- \_ Mayor coste.
- \_ Tras el curado, hay una pérdida alta de volumen.

### 1.2.2.1.2\_ Fibras de Carbono

Los materiales formados por polímeros reforzados con fibras, poseen miles de filamentos de micrómetros de diámetro. Las fibras actúan como refuerzos de los polímeros, su resistencia mecánica es mayor a la de estos y necesitarán de estos polímeros ya que, las fibras no pueden usarse como material de construcción por solas (*L. Colin, 1956*).

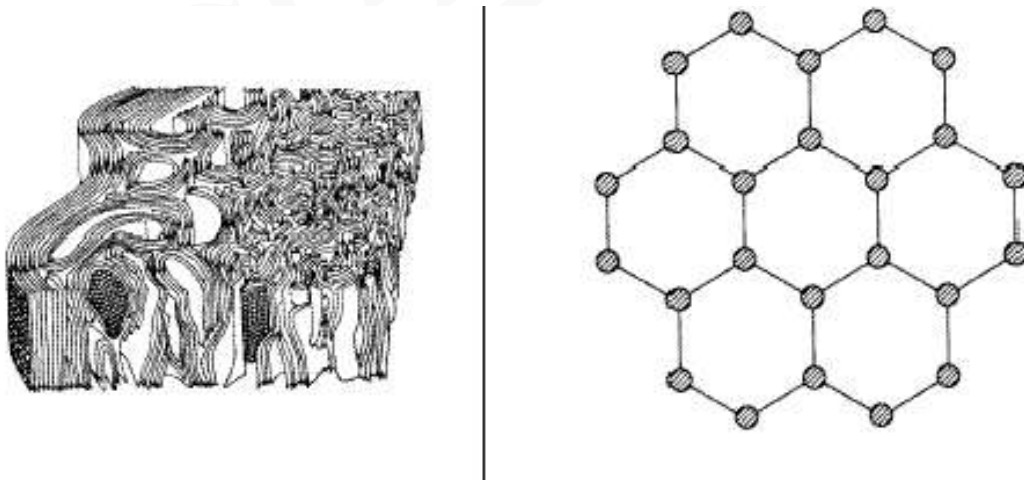
El eje más potente de las fibras, será el longitudinal, siendo la más débil la transversal. Podrán ser continuos o discontinuos, aunque los productos realizados con fibras continuas serán más fuertes (*H. V. S. GangaRao, 2006*).

Las fibras de carbono contendrán como mínimos un 90% de su peso total como carbono. Aquellas con una composición mayor al 95% de carbono se llamarán "fibras de grafito". para el procesamiento de las fibras, se usarán varios precursores, siendo los más usados el Pitch (brea, producto derivado del petróleo), poliacrilonitrilo (PAN), fibras celulósicas y algunas fibras fenólicas.

Son distinguidas de otros tipos de fibras por las grandes propiedades que tiene. Dependiendo de su procesado, tendrán unas características u otras (*H. V. S. GangaRao, 2006*). Su densidad es de  $1,6 \text{ g/cm}^3$ , menor a la de muchos otros materiales utilizados para la misma función.

La estructura molecular de las fibras que se están analizando, estarán compuestas por átomos de carbono, encontrándose ordenados en planos paralelos, formando hexágonos.

Estas uniones se están conformadas por fuerzas moleculares, dando lugar a redes tridimensionales foliadas (**Figura 1.9**) (*V. Calvet, 2014*).



**Figura 1.9**\_ Estructura atómica de las fibras de carbono

Para la producción del material, este deberá pasar por 4 etapas. La primera será la de la aplicación de un tratamiento termoestable, el la que las fibras se estiran a una temperatura de  $400^{\circ}\text{C}$  para poder organizar las cadenas de átomos de carbono, evitando que se fundan en las fases posteriores.

Se continuará con la fase de carbonización, la cual, esta vez calentará las fibras a  $800^{\circ}\text{C}$  en una atmósfera libre de oxígeno para poder eliminar las impurezas que no han sido carbonatadas. Se seguirá con un tratamiento de grafitización, en el que se volverán a elongar las fibras de un 50% a un 100%, llevándolas a una temperatura situada en un baremo comprendido entre  $1100^{\circ}\text{C}$  a  $3000^{\circ}\text{C}$ , proporcionando a las fibras, esa orientación final atómica cristalina con un alto módulo de Young.

Se finalizará con la fase del tratamiento superficial y dimensionado epoxi, donde se asegurará las uniones entre la resina epoxi y las fibras de carbono (*H. V. S. GangaRao, 2006*).

Son materiales con unas grandes prestaciones de durabilidad, con un excelente funcionamiento a altas temperaturas y ambientes húmedos, la absorción de humedad será nula, en la dirección longitudinal el aumento volumétrico será, prácticamente nulo, proporcionando gran estabilidad dimensional, elevado módulo de elasticidad, altas resistencias a tracción y rigidez, un comportamiento elástico lineal hasta su punto de rotura y grandes resistencias químicas (*L. Colin, 1956*).

### 1.2.2.1.3 Proceso de Fabricación

Dependiendo del proceso de fabricación que se de para las barras de CFRP, las fibras de su refuerzo, la acción de embeber estas por la matriz polimérica y su curación, será distinta. En el proceso de fabricación, las resinas se mezclan con modificadores y aditivos, para llegar a las propiedades de curado optimas, durabilidad, viscosidad y apariencia. Los factores fundamentales son los comportamientos a corto y largo plazo, en el proceso de fabricación del tipo de barras mencionadas son: propiedades y configuración de las fibras de carbono, de los aditivos, de las resinas y modificadores, porcentaje de resinas y volumen de fibra, junto a los parámetros inherentes del proceso (presión, temperatura, tiempo de curado y propiedades finales superficiales).

Las barras de CFRP, generalmente se fabrican por el método de pultrusión. También, se emplean variantes del método de pultrusión como lo son, pull-forming y pull-winding (*Peters, 1998*).

El procedimiento de pultrusión consistirá en el proceso (**Figura 1.10**): las fibras son enrolladas inicialmente en bobinas, se estiran continuamente a través de guías, seguidamente se introducirán en una máquina que precalentará las fibras para eliminar su humedad (esta humedad será un problema para la adherencia refuerzo/matriz), luego se introducirán en un baño de resinas poliméricas (mezcla compuesta de: resina polimérica, catalizadores, fillers y aditivos), se les dará una preforma y se curará la resina en una máquina de con resistencias térmicas, más tarde, el composite será estirado y cortado.



**Figura 1.10** Proceso de pultrusión. Adaptado de Strongwell

### 1.2.2.2 Tipos de Barras de CFRP

Las barras de CFRP no tienen grados de resistencia y módulo, geometría superficial y diámetros de barras estandarizados. La falta de esta es debida a la dependencia de las características físicas, mecánicas y comportamiento a corto y largo plazo, del proceso de fabricación y composición de barras de CFRP. Esto supondrá que las diferentes normativas de diseño de estructuras de hormigón armado con barras de CFRP (*ACI 440.1R-06; JSCE 1997(b); CAN/CSA-S806-02; FIB Task Group 9.3, 2007; CNR-DT 203/2006; IStructE, 1999*), no tenga valores estandarizados de características de barras de CFRP. Por lo que, los valores de características mecánicas de las barras de CFRP (Resistencias a tracción, módulo elástico y alargamiento de rotura) serán dados por cada fabricante de barras, de acuerdo con la normativa aplicable

en dicho país (V. Calvet, 2014).

### 1.2.2.2.1 \_Grados de Resistencia y Módulo

Las barras que se disponen comercialmente, difieren mucho en grados de resistencia a tracción y módulo elástico.

Las normas de diseño de hormigón armado estructural con barras de CFRP, *ACI-440.1R-06*; *JSCF 1997(b)*; *CNR-DT 203/2006*, marcan grados mínimos de resistencia a tracción y módulo elástico.

La norma *ACI-440.1R-06*, marca una resistencias mínimas a tracción de 414 MPa, y un módulos elásticos mínimos de 110m3 GPa (denominado E 110,3). Del mismo modo, en un intento de marcar unos estándares, los armados de CFRP se desarrollan en una clasificación de grado de resistencia a tracción. La cual comienza con un grado mínimo F60 (con una resistencia a tracción mínima de 414 MPa), y termina con un grado F290. El paso de un grado inferior al siguiente superior se realiza mediante incrementos de 69 MPa (V. Calvet 2014):

\_ Grado F60:  $414 \text{ MPa} \leq f_{tu}^* < 483 \text{ MPa}$ .

\_ Grado F70:  $483 \text{ MPa} \leq f_{tu}^* < 552 \text{ MPa}$ .

\_ Grado F... (hasta).

\_ Grado F290:  $1999 \text{ MPa} \leq f_{tu}^* < 2069 \text{ MPa}$ .

La norma *JSCF 1997(b)*, dictamina valores de referencia mínimos de módulo elástico y resistencia a tracción, con dependencia del tipo de geometría superficial (CR y CD, en el que CR son barras de CFRP deformadas), volumen de fibra (entre 50-65%) y diámetro (A y B, en el que A:  $D \leq 20\text{mm}$ , B:  $D \geq 20\text{mm}$ ) de los redondos de CFRP (**Tabla 1.7**).

Identificación	Volumen de Fibras (%)	$f_{fu}^*$ (MPa)	Módulo elástico (GPa)
CR65, CD65	63-66	1.240	99-170
CR50A, CD50A	49	960	200
CR50B, CD50B	49-52	780	190

**Tabla 1.7** \_Resistencia a tracción y módulo elástico mínimo de las barras de CFRP.  
Adaptación de *JSCF 1997(b)*.

La normativa *CNR-DT 203/2006*, dictamina que las resistencias a tracción característica mínima de las barras de CFRP, no puede ser menor a 400MPa y el valor medio del módulo elástico no podrá ser nunca inferior a 100GPa.

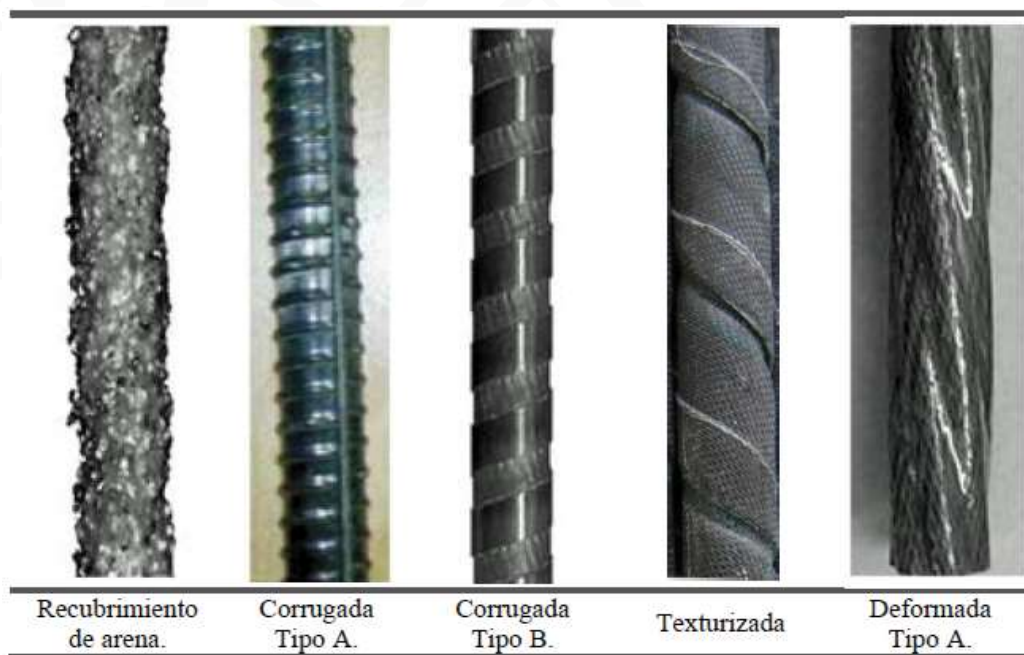
### 1.2.2.2.2 \_Geometría Superficial

No existe estandarización de la geometría superficial de las barras de CFRP actualmente. Por lo tanto y por la multitud de procesos de fabricación, se pueden encontrar gran variedad de tipos de geometrías superficiales de redondos de CFRP comerciales (**Figura 1.11 y 1.12**).

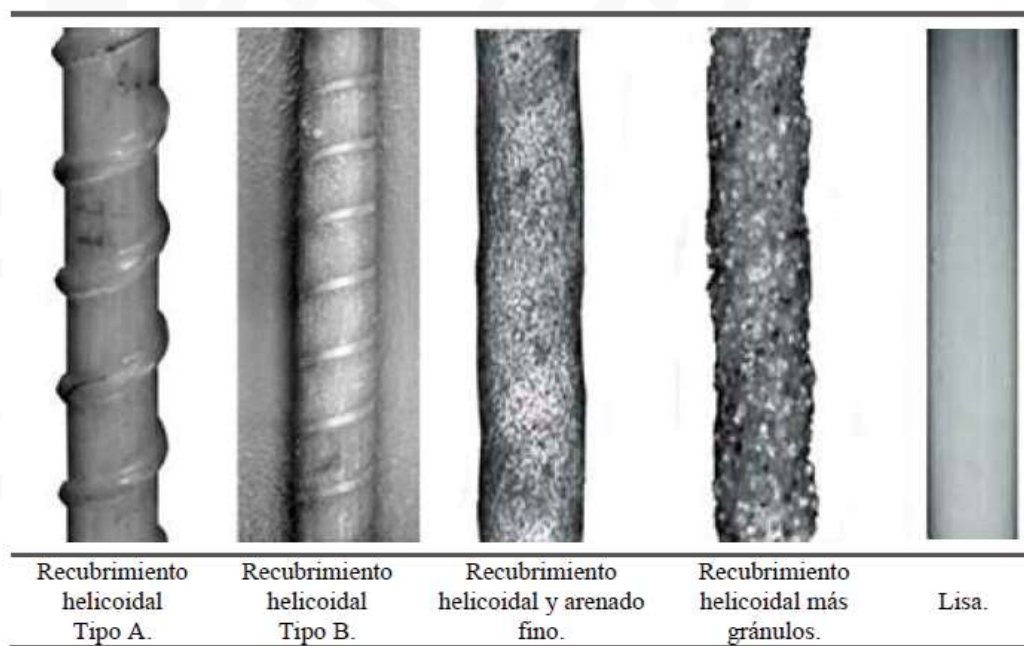
### 1.2.2.2.3 \_Diámetro de las Barras

La normativa *ACI 440.1R-06* marca una clasificación de diámetros de los redondos de CFRP (**Tabla 1.8**), está define los diámetros de las barras de CFRP con numeración que corresponde aproximadamente con el diámetro nominal de la barra en milímetros. La clasificación es idéntica a la marcada por la norma ASTM para los armados de acero.

Los diámetros nominales de las barras de formadas de CFRP son equivalentes al diámetro de una barra redonda y lisa, cuya área de sección transversal tenga la misma superficie.



**Figura 1.11** Variedad de geometrías de barras de CFRP. *Katz et al., 1999, 2000; Bank, 2006; Esfandeh et al., 2009; Wang et al., 2006.*



**Figura 1.12** Variedad de geometrías superficiales de barras de CFRP. *Katz et al., 1999, 2000; 2006; Esfandeh et al., 2009; Wang et al., 2006.*

Las otras normativas para el diseño de hormigones armados estructurales con armados de rondos de CFRP, (*JSCE 1997(b), CAN/CSA-S806-02, FIB Task Group 9.3, 2007, CNR-DT 203/2006, IStructE, 1999*), no marcan clasificación alguna de diámetros de barras de CFRP.

Designación del tamaño de barra		Diámetro nominal	Área
Estándar	Conversión métrica	(mm)	(mm <sup>2</sup> )
Nº2	Nº6	6,4	31,6
Nº3	Nº10	9,5	71
Nº4	Nº13	12,7	129
Nº5	Nº16	15,9	199
Nº6	Nº19	19,1	284
Nº7	Nº22	22,2	387
Nº8	Nº25	25,4	510
Nº9	Nº29	28,7	645
Nº10	Nº32	32,3	819
Nº11	Nº36	35,8	1006

**Tabla 1.8** Diámetros de las barras de CFRP que contempla la *ACI 440.1R-06*. Adaptado de *ACI 440.1R-06*.

#### 1.2.2.2.4 Identificación de las Barras

Se contempla la identificación de barras de CFRP por parte de diferentes normativas para el diseño de hormigón armado estructural con este tipo de barras como armado.

La normativa *ACI 440.1R-06* establece la siguiente identificación para barras de CFRP:

XXX-C#5-F200-E200

\_ Identificación del fabricante (XXX).

\_ Letra identificadora del tipo de barra ("C" para el ejemplo), seguido del diámetro nominal del redondo (**Tabla 1.8**).

\_ Grado de resistencia de la barra ("F200" para el ejemplo), de acuerdo al punto 1.2.2.2.1.

\_ Grado de módulo de elasticidad e los redondos ("E200" para este ejemplo), de acuerdo al punto 1.2.2.2.1.

\_ Cuando esté disponible, se añade la clasificación del grado de adherencia.

La normativa *JSCE 1997(b)* marca la siguiente identificación para barras de CFRP:

CR50A

\_ Identificación del tipo de la fibra mediante letra ("C" para el ejemplo).

\_ Identificación del tipo de geometría superficial de la barra de CFRP: "D" para barras deformadas, "R" para barras lisas o lisas con recubrimiento superficial.

\_ Porcentaje mínimo de fibras de refuerzo, número (50 ó 65).

\_ Identificación del diámetro de la barra mediante letra: A y B, donde a:  $D \leq 20\text{mm}$ , B:  $D \geq 20\text{mm}$

La normativa Italiana *CNR-DT 203/2006* marca la identificación para las barras de VFRP individualizada siguiente (**Figura 1.13**):

<b>FICHA TÉCNICA: barras de CFRP para estructuras de hormigón armado.</b>		
El fabricante debe aportar los valores estadísticos necesarios para el cálculo de las resistencias características (p.e. la media, la desviación estándar, población, percentil).		
<b>Descripción.</b>		
Nombre comercial, tipo de fibra, tipo de resina, proceso de fabricación y cualquier información que resulte útil.		
<b>Propiedades geométricas y físicas.</b>		
Propiedades	Unidades	Método de ensayo
Geometría superficial		Apéndice B
Área equivalente.	mm <sup>2</sup>	Apéndice B
Perímetro equivalente.	mm	Apéndice B
Color.		
Densidad.	Fibra.	ISO 1183-1:2004(E)
	Matriz.	
Contenido de Fibra.	Peso.	ISO 11667:1997(E)
	Volumen.	
	T <sub>g</sub> .	ISO 11357-2:1999(E)(DSC) ISO 11359-2:1999(E)(TMA) ASTM E1640 (DMA)
Temperatura máxima de uso.	°C	
Conductividad térmica.	S/m	
<b>Propiedades.</b>		
Propiedades	Unidades	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a tracción.	GPa.	Apéndice B/ISO527-4,5:1997(E)
Resistencia a tracción (valor medio y característico).	MPa.	Apéndice B/ISO527-4,5:1997(E)
Alargamiento de rotura.	%	Apéndice B/ISO527-4,5:1997(E)
Fluencia.		ISO899-1:2003(E)
Relajación.		
Tensión de adherencia media.		Pullout
<b>Condiciones de Almacenaje.</b>		
<b>Seguridad y manipulación.</b>		

**Figura 1.13** Identificación de las barras de CFRP. Adaptado de *CNR-DT 203/2006* (Apéndice C).







# CAPÍTULO 2

## Propiedades y Coste de los armados de Acero y CFRP en estructuras de hormigón armado

En el capítulo se indicarán las diferentes propiedades tanto físicas, como mecánicas y de durabilidad de las barras de Acero y CFRP, así como la adherencia de estas con el hormigón. Para todo esto se estudiarán los dos tipos de barras nombradas anteriormente para una posterior comparación en capítulos posteriores.

El punto clave para la evaluación de las propiedades de las barras de CFRP será el volumen y masa relativos de los materiales que los constituyen. Estos se calcularán mediante las ecuaciones de las **Ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5** (los subíndices se referirán a: c: composite, f: fibra y m: matriz respectivamente, v se referirá al volumen, y V al volumen relativo. Se usará las mismas denominaciones para la masa relativa M y para la masa de composite m).

$$v_c = v_f + v_m \quad (2.1)$$

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}, \gamma, V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2.2)$$

$$V_f + V_m = 1 \quad (2.3)$$

$$m_c = m_f + m_m \quad (2.4)$$

$$M_f = \frac{m_f}{m_c}, \gamma, M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (2.5)$$

### 2.1 Propiedades físicas

#### 2.1.1 Densidad

La densidad de las barras de acero será cinco veces mayor a la de las barras de CFRP, basándose en matrices termoestables y con un volumen de fibra,  $V_f$  de 50-75% (**Tabla 2.1**). La menor densidad de las barras de CFRP proporciona menor peso a la estructura, con facilidades para la trabajabilidad durante el proceso de construcción con un menor coste para su transporte.

Matriz/Composite	CFRP (Kg/m <sup>3</sup> )	Acero (Kg/m <sup>3</sup> )
Poliéster	1.430-1.650	
Epoxi	1.440-1.670	7.850
Viniléster	1.440-1.630	

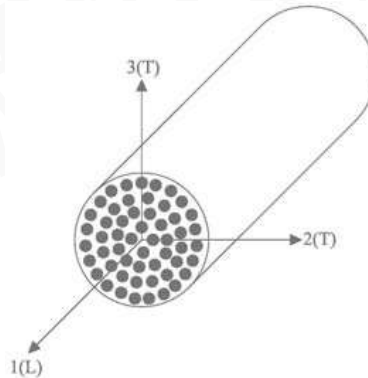
**Tabla 2.1** Densidades de las barras de CFRP y Acero. Adaptado de *FIB, 2007*.

Las densidades de las barras de CFRP se podrá calcular mediante las densidades de los materiales que conformen la barra (**Ecuación 2.6**).

$$\rho_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (2.6)$$

### 2.1.2\_Coeficiente de Dilatación Térmica

Por la anisotropía de los redondos de CFRP, el coeficiente de expansión térmica (CTE) en el eje longitudinal ( $\alpha_L$ ), en el que será prioritarias las propiedades de las fibras, mientras que en el eje transversal el CTE ( $\alpha_T$ ), estará dictaminado por la matriz polimérica (**Figura 2.1**). Los dos CTEs,  $\alpha_L$  y  $\alpha_T$ , se calculan con las **Ecuaciones 2.7 y 2.8**.



**Figura 2.1** Ejes de las barras de CFRP. Adaptado de *FIB, 2007*

$$\alpha_L = \frac{E_{fL} \cdot V_f \cdot \alpha_{fL} + E_m \cdot V_m \cdot \alpha_m}{E_{fL} \cdot V_f + E_m \cdot V_m} \quad (2.7)$$

$$\alpha_T = V_f \cdot \alpha_{fT} + V_m \cdot \alpha_m + V_f \cdot v_{fLT} (\alpha_{fL} - \alpha_L) + V_m \cdot v_m (\alpha_m - \alpha_L) \quad (2.8)$$

En el que:  $\alpha_{fL}$ , es el eje longitudinal de las fibras en el CTE.  $\alpha_{fT}$ , es el es la dirección transversal de las fibras es el CTE.  $E_{fL}$ , será el módulo de las fibras nombradas anteriormente en el eje longitudinal.  $E_m$  será el módulo de la matriz polimérica. Y por último,  $v_{fLT}$ , será el coeficiente de Poisson en el eje LT de las fibras.

En la siguiente **Tabla 2.2**, se puede observar las barras de CFRP en el CTE, con volúmenes de fibras de 50-70%, las barras de acero y hormigón.

Dirección	Coeficiente de Expansión Térmica ( $\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )			
	Acero	Acero Inoxidable	CFRP	Hormigón
Longitudinal, $\alpha_L$	11	10 a 16,5	-9 a 0	7 a 13
Transversal, $\alpha_T$	11	10 a 16,5	74 a 104	7 a 13

**Tabla 2.2** CTE de barras de CFRP, Acero y hormigón. Adaptado de *FIB, 2007*.

En la **Tabla 2.2**, se puede ver como las barras de CFRP tienen en el eje longitudinal un CTE negativo, lo que nos indica que un incremento de la temperatura originará una retracción de esa sección y en la sección transversal se producirá una expansión de la barra de CFRP. Si se disminuyese la temperatura, ocurriría lo contrario.

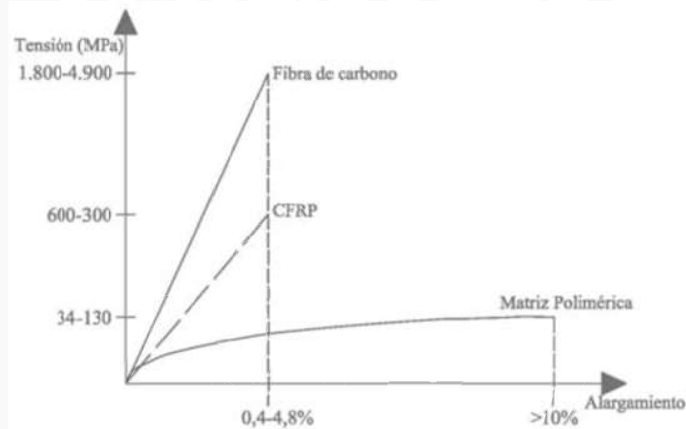
### 2.1.3\_Conductividad Eléctrica

La fibra de carbono son conductoras eléctricas y su resistividad eléctrica es de aproximadamente 1500  $\Omega\text{m}$ . La matriz polimérica utilizada en los composites de CFRP no serán conductoras eléctricas, teniendo una gran resistividad eléctrica, de aproximadamente  $10^{20} \Omega\text{m}$ . La matriz polimérica es la que desarrolla la función de aislante eléctrico en los composites de CFRP, ya que al envolver a las fibras de carbono, le darán esta propiedad no magnética, lo que le permitirá a estas barras, poder ser utilizados en armados en las que las estructuras requieran materiales que no sean conductores eléctricos y que no sean magnéticos.

## 2.2\_Propiedades Mecánicas

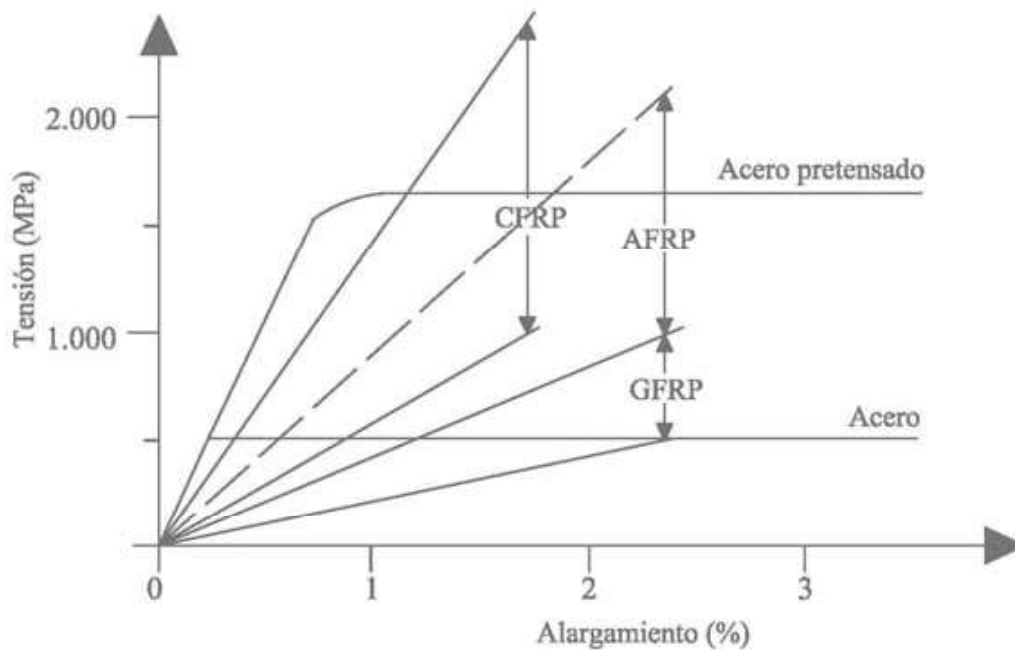
### 2.2.1\_Tracción

Los redondos de CFRP, por su anisotropía, poseen diferentes comportamientos frente a esfuerzos de tracción en los ejes principales de la barra. El eje longitudinal de la barra la dominarán las fibras de carbono, presentando un buen comportamiento a esfuerzos traccionales. En el eje transversal lo domina la matriz polimérica ( ). Debido a que las barras de CFRP son elementos longitudinales, el comportamiento prioritario será el traccional, el cual, dominan las fibras de carbono. (**Figura 2.2**).



**Figura 2.2** Comportamiento de las fibras de carbono tensión/deformación, de la matriz polimérica y de la barra de CFRP. Adaptado de *ISIS, 2000*.

El comportamiento de los redondos de CFRP será elástico y lineal hasta su rotura. Al contrario de los armados en acero, no se plastifican, por lo que la rotura será frágil (*ACI 440.1R-06; FIB Task Group 9.3, 2007*) (**Figura 2.3**).



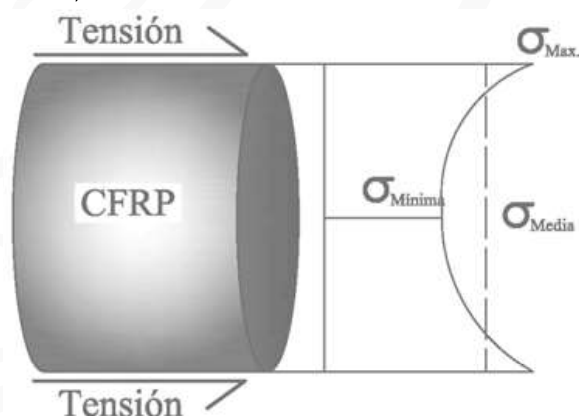
**Figura 2.3** Comportamiento de las barras de CFRP tensión/deformación y acero. Adaptado de *Gdoutos et la., 2000*.

Las barras de CFRP tendrán una resistencia a tracción que variará entre 600-3690 MPa (valores para barras con porcentajes comprendidos entre 50-70% de volumen de fibras), es hasta 5 veces la del armado en acero (**Tabla 2.3**). El módulo elástico dependerá del tipo de esfuerzo de la fibra de carbono (las fibras de carbono con un módulo alto, poseen un módulo elástico de 350-650 GPa), las de alta resistencia alrededor de 240 GPa), oscilará entre 120-580 GPa. La elongación de rotura variará entre 0,5-1,7% (*ACI 440.1R-06; FIB Task Group 9.3, 2007*).

Propiedades/Armado	Acero	CFRP
Limite elástico (MPa)	276-517	-
Resistencia a tracción (MPa)	483-690	600-3.690
Módulo elástico (GPa)	200	120-580
Alargamiento elástico (%)	0,14-0,25	-
Alargamiento de rotura (%)	6,0-12,0	0,5-1,7

**Tabla 2.3** Propiedades mecánicas de las barras de CFRP y acero a tracción. Adaptado de *ACI 440.1R-06*.

Un aumento del diámetro de las barras de CFRP, contrariamente a lo que se pueda pensar, provoca disminución de la resistencia a tracción (*ACI 440.1R-06; FIB Task Group 9.3, 2007; Achillides et al., 2004*) (**Figura 2.4**). La disminución se deberá a las diferentes respuestas de las fibras de carbono situadas en el alma y en la superficie de las barras (no plastificará la sección de la barra por su comportamiento elástico y lineal), producirá una distribución no uniforme de tensiones en la sección transversal de la barra de CFRP (*Z. Achillides et al., 2004*).



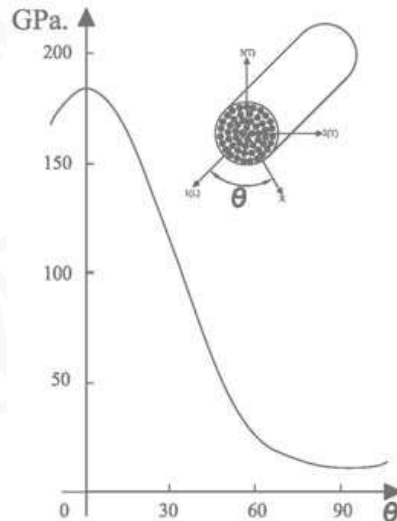
**Figura 2.4** Distribución de las tensiones normales en la sección transversal de una barra de CFRP. Adaptado de *Achillides et al., 2004*.

Se observan reducciones en las resistencias a tracción de las barras desarrolladas de forma curva a las rectas (*ACI 440.1R-06; FIB Task Group 9.3, 2007; JSVE 1997(b)*). La reducción de esta resistencia de las barras curvas respecto a las rectas, será del 40-50% y se producen por la concentración de tensiones en la parte curva de la barra (*ACI 440.1R-06; Nanni et al. 1998*).

Ya que las barras de CFRP son elementos anisótropos y unidireccionales, la resistencia a tracción y su rigidez variará dependiendo de la dirección de las tensiones que se le apliquen. Por esto, la resistencia a tracción y rigidez en el eje longitudinal de los redondos, disminuirá muchísimo cuando la tensión aplicada se haga con un ángulo,  $\theta$ , superior a  $15^\circ$  (**Figura 2.5**) (*FIB Task Group 9.3, 2007; Peters, 1998*).

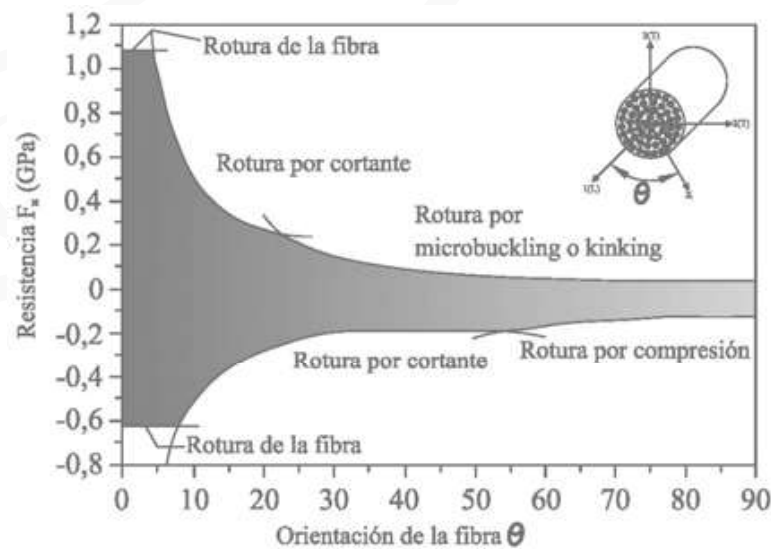
### 2.2.2\_ Compresión

Existen varias normativas de diseño para hormigones armados con barras de CFRP estructurales que no recomiendan el uso de las barras de CFRP en elementos que sean sometidos a compresión axial (*ACI 440.1R06; JSCE 1997(b); CAN/CSA-S806-02; FIB Task Group 9.3, 2007; 203/2006; IStructE, 1999*).



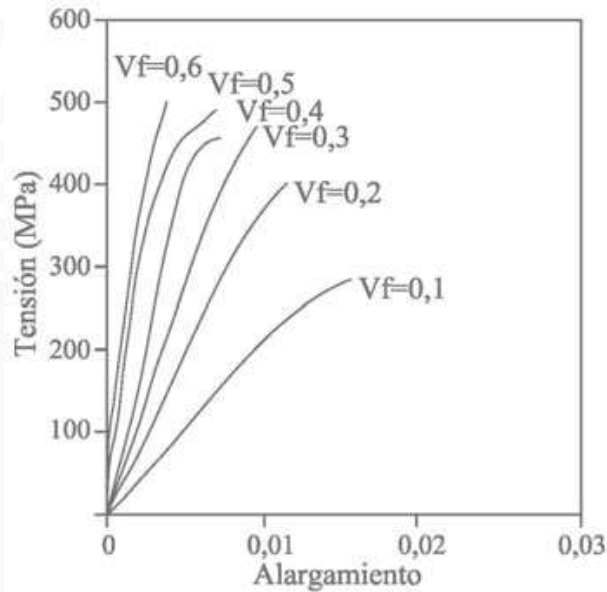
**Figura 2.5** Influencia del ángulo de la tensión aplicada en la rigidez de las barras de CFRP. Adaptado de Peters, 1998.

Las resistencias a compresión de las barras de CFRP es menor a su resistencia a tracción, puesto que el modo de rotura de la barra, cambia de rotura de las fibras de carbono por tracción, a rotura por microbuckling (micropandeo) de las fibras, rotura por compresión de la matriz polimérica, kinking (rotura producida por la aplicación de un esfuerzo de compresión axial y la barra rompe por doblado de la misma. Yuan et al., 1999) o rotura por cortante de la barra (**Figura 2.6**). Por lo que, la resistencia a los esfuerzos de compresión de las barras de CFRP dependerá de las propiedades de la matriz polimérica, de las fibras de carbono y del porcentaje de volumen de fibras (**Figura 2.20**) (FIB Task Group 9.3,2007; Yuan et al., 2001).



**Figura 2.6** Modos de rotura de las barras de CFRP en función del ángulo de la tensión aplicada. Adaptado de Peters., 1998.

Las roturas de barras de CFRP a compresión dependerá sobretodo del porcentaje de fibras en cuanto al volumen total de la barra. Incrementándose este porcentaje de fibras del 10% al 40%, su modo de rotura cambia de rotura por cortante ( $10% < V_f < 40%$ ) a rotura por kinking ( $40% < V_f$ ). A su vez, el ángulo de rotura de los redondos, dependerá del porcentaje de volumen total de fibras de carbono. El incremento de estas, aumentará el ángulo de rotura a cortante de la barra, con  $V_f=10%$  este ángulo de rotura será de  $\alpha=45^\circ$ , hasta  $V_f=30%$  con un ángulo de rotura de  $\alpha=64^\circ$  (Yuan et al., 2001).

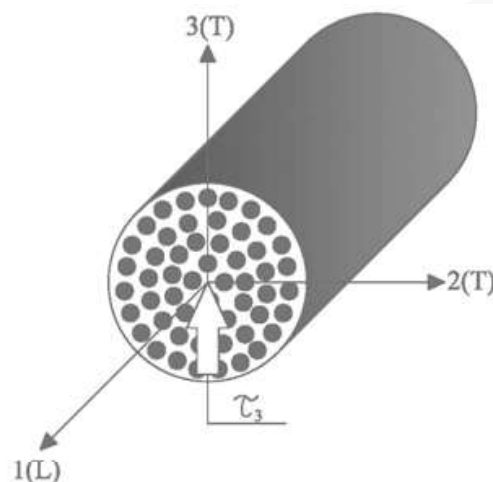


**Figura 2.7**\_ Influencia del porcentaje del volumen total de las barras de CFRP de fibra de carbono en su resistencia. Adaptado de *Yuan et al., 2001*.

El comportamiento frente a esfuerzos de compresión axial de las barras de CFRP es aproximadamente elástico lineal hasta la rotura (**Figura 2.7**) (*Yuan et al., 2001*), y poseen una resistencia a compresión alrededor del 78% de la resistencia a tracción. Generalmente, la resistencia a compresión es mayor en barras con mayor resistencia a tracción (*Mallick 1998*). En cuanto al módulo elástico a compresión, este es del orden del 85% del módulo elástico a tracción (*Mallick, 1998*).

### 2.2.3\_Cortante

Las barras de CFRP se comportarán frente a esfuerzos de corte principalmente por el dominio de las propiedades mecánicas de la matriz polimérica y por su distribución de tensiones a lo largo de la sección transversal del redondo. (**Figura 2.8**) Por lo que, su resistencia frente a los esfuerzos dichos anteriormente de corte transversal, variará mucho de un fabricante a otro. Aunque, los métodos para los ensayos a cortante no están estandarizados (*ACI 440.1R-06*), se deberán obtener por cada fabricante de barras de CFRP (deberá describir el método utilizado para el ensayo). Normalmente la resistencia a corte de las barras de CFRP será superior a 120 MPa (*Fortecstabilization, 2010*).



**Figura 2.8**\_ Tensión de corte transversal ( $\tau_3$ ) aplicada a una barra de CFRP. Adaptado de *FIB, 2007*.



La rotura de las barras de CFRP por cortante podrá ser debido a splitting de la matriz polimérica (sin corte de las fibras de carbono), ya que, la tensión de corte actuará en el plano perpendicular a la dirección de las fibras. Las fibras no resisten a esfuerzos de corte y, aún peor, las secciones transversales de las fibras pueden ser consideradas como inclusiones circulares en la matriz polimérica causando concentraciones de tensiones en las mismas. Hasta el día de hoy, no se han desarrollado modelos teóricos para el cálculo de resistencia a corte. Un método de diseño preliminar, sería el de estimar la resistencia a corte de la barra de CFRP como la resistencia a corte de la matriz polimérica (*Barbero, 1999*).

Con el fin de mejorar la resistencia frente a esfuerzos cortantes de las barras de CFRP, los fabricantes de estas, introducen un zunchado en las barras (el método de fabricación de este tipo de barras de CFRP se llamará pull-winding) o fabrican barras con fibras de carbono dispuestas, tanto longitudinalmente como transversalmente (*ACI 440.1R-06*).

## 2.3\_Durabilidad

El concepto de durabilidad de un material se definiría como:

“la capacidad para resistir la fisuración, oxidación, degradación química, deslaminación, reducción de las propiedades mecánicas y efectos de cualquier daño producido durante un periodo de tiempo considerado, bajo condiciones ambientales y de carga determinadas”, (*Karbhari et al., 2003*).

La reducción de las propiedades mecánicas de las barras de CFRP bajo las diferentes condiciones ambientales dependerá de diversos factores, como lo son, el tipo de fibra de carbono y resina polimérica, interfaz fibra-matriz, condiciones del curado, controles de calidad durante su fabricación y niveles de agresividad ambiental (*GangaRao et al., 2007*). En el composite, las fibras de carbono serán el elemento encargado de aguantar las cargas, a su vez, la matriz polimérica protegerá a estas y al composite de posibles daños, mantendrá su alineamiento y facilitará la distribución de las cargas a las fibras. Se pueden añadir aditivos a la resina polimérica que mejorarán el comportamiento del composite frente a condiciones de durabilidad (*GangaRao et al., 1995; Kato et al., 1998*).

Las condiciones ambientales podrán afectar a la durabilidad de las barras de CFRP en cuanto a resistencia, rigidez, interacción fibra/matriz y micro o macro fisuración, pudiendo ser ocasionados por: agua, soluciones químicas, frío prolongado, ciclos térmicos, temperaturas altas, gradiente térmico, oxidación radiación U.V., envejecimiento y fuego (*GangaRao et al., 1995*).

Además, las propiedades mecánicas y de durabilidad de las barras de CFRP se influenciarán por: los enlaces químicos entre las cadenas poliméricas a través de la densidad de los enlaces y del porcentaje de curado, de las fuerzas covalentes y de van der Waals; y del estado físico del composite, incluyendo su morfología, tamaño y orientación de la fibra. Normalmente, a través de las interacciones moleculares entre sustancias predominante en el ambiente el composite envejecerá y se degradará estructuralmente.

Las acciones higrotérmicas podrán originar: fisuraciones en el composite, deslaminado fibra/matriz, pérdida de la distribución de las fibras y un incremento de las tensiones inducidas en la barra (*Parkyn, 1985; Rao et al., 1981*).

### 2.3.1\_Efecto del Agua

La penetración de agua en los redondos de CFRP se producirá por: difusión por la matriz polimérica, por grietas o por poros superficiales de la barra. En este caso, el agua no penetrará en forma líquida, las moléculas de esta entran en el interior de la matriz uniéndose a los enlaces de hidrógeno del polímero. Las moléculas de agua se disolverán en la superficie del polímero e irán al interior de la matriz incrementando el gradiente de concentración de agua. La penetración a través de poros o grietas será por capilaridad (*Parkyn 1985; Rao. et al., 1981*).

La entrada de agua a la matriz polimérica producirá ablandamientos por hidrólisis, lo que reducirá las propiedades del composite. esta reducción podrá aumentar en presencia de tensión y temperatura (> 60°C) (*Chateauinois et al., 1993*).

La rotura de las barras de CFRP por cortante podrá ser debido a splitting de la matriz polimérica (sin corte de las fibras de carbono), ya que, la tensión de corte actuará en el plano perpendicular a la dirección de las fibras. Las fibras no resisten a esfuerzos de corte y, aún peor, las secciones transversales de las fibras pueden ser consideradas como inclusiones circulares en la matriz polimérica causando concentraciones de tensiones en las mismas. Hasta el día de hoy, no se han desarrollado modelos teóricos para el cálculo de resistencia a corte. Un método de diseño preliminar, sería el de estimar la resistencia a corte de la barra de CFRP como la resistencia a corte de la matriz polimérica (*Barbero, 1999*).

Tras estudios realizados hasta el día de hoy sobre la influencia de ambientes acuosos sobre las propiedades mecánicas de las barras de CFRP, se puede ver que la resistencia a tracción durante la exposición de las barras de CFRP al agua con unas temperaturas medias de 25-60-70 °C, no produce pérdida de resistencias de forma considerable a edades de ensayo máximas de 1 año (*Arockiasamy et al., 1996; Micelli, 2001; Myers, 2011; Nanni, 2001; Porter, 1997; Rahman, 1998; Tannous et al., 1998*). El comportamiento se deberá al tipo de matriz polimérica que presentan las barras de ensayo, como los son las termoestables, puesto que poseen un bajo coeficiente de absorción de humedad (**Tabla 2.4**) y las cadenas moleculares se encuentran unidas mediante fuerzas covalentes, lo que hará que tengan un buen comportamiento en ambientes acuosos.

### 2.3.2\_Efecto de los Cloruros

Las diferentes investigaciones (*Saadatmanesh y Tannous, 1997; Sasaki et al., 1997; Sen et al., 1997; GangaRao y Vijay, 1997; Chin et al., 1997; Steckel et al., 1998; Rahman et al., 1998; Toutanjo y ElKorcho, 1998*) referente a la exposición de barras de CFRP ante ambientes en presencia de concentración de cloruros (de hasta un 4%), cambiando la humedad ambiental, con o sin tensión aplicada en al barra y rangos de temperatura entre 20 y 70 °C, se puede ver que la disminución de las propiedades mecánicas de las barras de CFRP es prácticamente despreciable (*V. Calvet, 2014*).

### 2.3.3\_Efecto de los Álcalis

En ensayos realizados con esfuerzos de tracción y cortante en barras de CFRP (con matriz polimérica de epoxi) de Ø 9.0 mm, en ambiente alcalino, con un PH de 13.6 (imitando el ambiente el hormigón) efectuados por *Davalos et al., 2005*, se puede ver **Tabla 2.4 y Tabla 2.5**.

“Las barras de CFRP mostraron una reducción de su resistencia a tracción tras la exposición al ambiente alcalino durante 70 días y a una temperatura de 60°C, del 4% de su resistencia a tracción inicial. Al mismo tiempo, su resistencia a corte solo se vio reducida un 4% tras la exposición a dicho ambiente y 600 ciclos de hielo deshielo”.

Tipo de barra	Ambiente	Nº de probetas	$f_{fm}$ (MPa)	COV <sup>10</sup> (%)	Resistencia residual
CFRP	Sin exposición ambiental	5	2.588	5	1,00
	Solución alcalina a 60°C, durante 70 días.	4	2.476	9	0,96

**Tabla 2.4**\_Comportamiento a tracción de las barras de CFRP, ambientes sin exposición ambiental vs ambientes alcalinos. Adaptado de *Davalos et al., 2005*, Tabla 5.

*Takewaka y Khin (1996)*, obtuvieron como resultados a la exposición en un ambiente alcalino de las barras de CFRP, pérdidas de resistencia y rigidez de 0 a 20% de su resistencia y rigidez inicial

Tipo de barra	Ambiente	Nº de probetas	Resistencia a cortante (MPa)	COV (%)	Resistencia residual
CFRP	Sin exposición ambiental	9	50	5	1,00
	Solución alcalina y 600 ciclos de hielo/deshielo	5	48	2	0,96

**Tabla 2.5** Comportamiento a cortante transversal de las barras de CFRP, ambientes sin exposición ambiental vs ambientes alcalinos. Adaptado de *Davalos et al., 2005, Tabla 6*.

*Steckel et al., (1998)*, realizaron pruebas introduciendo barras de CFRP en una disolución de  $\text{CaCO}_3$  (PH 9.5) con una temperatura de 23 °C durante 125 días, tras los que las barras de CFRP no experimentaron disminución de su resistencia.

Autor	PH	Ambiente	Temp.	Duración	Pérdida de resistencia
Tannous et al., 1998.	12	Sat. $\text{Ca}(\text{OH})_2$	60°C	1 año	0%
			25°C	1 año	0%
			60°C	1 año	0%
			25°C	1 año	0%
Porter, 1997.	13	Sat. $\text{Ca}(\text{OH})_2$	60°C	4 meses	0%
Micelli, Myers, Nanni, 2001.	12,6	0,16% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ +1% NaOH+1,4%KOH	60°C	21 días	0%
				42 días	8%
				42 días	0%
Arockiasamy et al., 1998.	13-14	58gr/l NaOH	70°C	9 meses	0%

**Tabla 2.6** Reducción de resistencia a tracción de las barras de CFRP en presencia de ambientes alcalinos. Adaptado de *FIB, 2007, Tabla 3.1*

La normativa *Fib Task Group 9.3, 2007*, de diseño de hormigón armado estructural, recoge un recopilatorio de investigaciones sobre el comportamiento mecánico y de durabilidad de las barras de CFRP en ambientes alcalinos (**Tabla 2.6**). Esta normativa se afirmará en su apartado 3.4.3:

“Las barras de CFRP no muestran una disminución de resistencia significativa en presencia de agentes alcalinos”.

#### 2.3.4 Efecto de la Radiación Ultravioleta

Las barras de CFRP expuestas a rayos U.V. y humedad antes de su colocación en el interior del hormigón, podrá menguar su resistencia a tracción por su pérdida de peso molecular y enlaces moleculares de la matriz polimérica (*Bank y Gentry, 1995; Kato et al., 1998; Peters 1998*). En cuanto las barras de CFRP entran en servicio (embebidas en el hormigón), sin exposición a rayos U.V., no presentarán ninguna disminución de resistencia (*Tomosawa y Nakatsuji, 1997*). Siguiendo las recomendaciones de colocación y uso de las barras de CFRP, junto con los adecuados aditivos en la composición de las resinas poliméricas, se podrá eliminar el citado problema. Las investigaciones realizadas por *Sasaki et al., (1997)*, de la exposición de barras de CFRP a los rayos U.V. y humedad, concluyeron con una pérdida de 0 a 20% de su resistencia a tracción inicial.

*Kato et al., (1997)*, estudiaron el comportamiento de barras de CFRP con una exposición en ambiente de rayos U.V. (0.2MJ/m<sup>2</sup>/hora) y ciclos de humectación/secado (250,750 y 1250 ciclos de humectación/secado) con una temperatura de 26 °C, se obtienen reducciones de su resistencia a tracción de aproximadamente el 0%.

### 2.3.5\_Efecto de la Carbonatación del Hormigón

No se ha estudiado en gran medida los efectos de la carbonatación del hormigón en las barras de CFRP, a excepción del proyecto *EUROCRETE*, que ha realizado investigaciones sobre este fenómeno, *Sheard et al., (1997)*, basándose en su investigación concluyó:

“La carbonatación del hormigón no mostró deterioros de las propiedades mecánicas de las barras de CFRP, al contrario, esta produce una reducción del PH, lo cual incrementa la vida de servicio y mejora la durabilidad de las barras de CFRP”.

### 2.3.6\_Efecto de la Temperatura

La temperatura modificará las propiedades mecánicas y la absorción de humedad de las barras de CFRP (*Allred, 1984; Devalapura et la., 1998; GangaRao et la., 2001; Katz et la., 1998, 1999; Pritchard y Speake, 1998*).

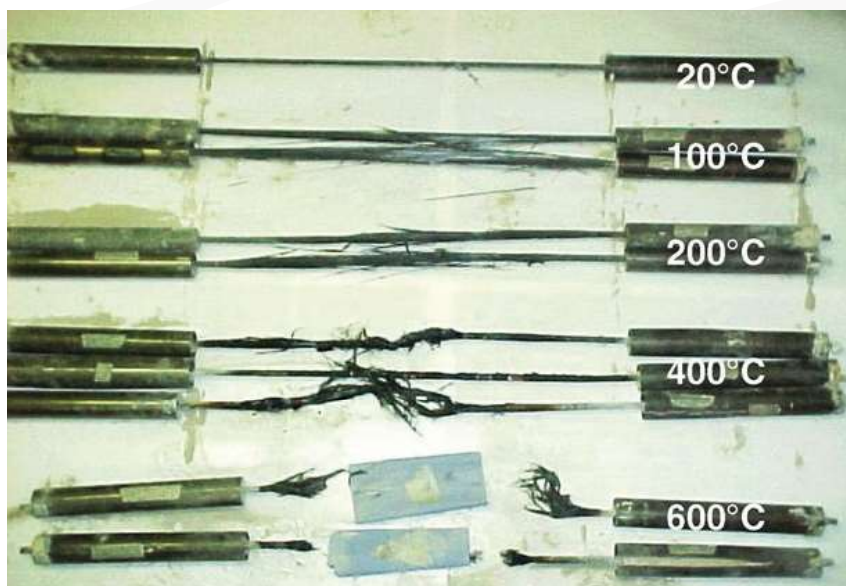
La matriz polimérica empieza a perder rigidez a una temperatura llamada, temperatura de transición vítrea “ $T_g$ ”. A partir de la  $T_g$  el módulo elástico de la matriz polimérica comenzará a degradarse debido a cambios en la estructura molecular (véase Capítulo 2, apart. 2.2.1) (*Fried, 1995*). El valor de la  $T_g$  en las barras de CFRP dependerá del tipo de resina polimérica, puesto que las fibras de carbono tienen una resistencia muy elevada a las altas temperaturas (véase Capítulo 2, apart. 2.2.2) (*Bottle et al., 2001*).

Los redondos de CFRP son elementos unidireccionales, desarrollan su trabajo en la dirección longitudinal. Esta dirección está predominada por las fibras de carbono, pero, al incrementar la temperatura, su resistencia mecánica en esa dirección disminuirá considerablemente, ya que la transmisión de tensiones dentro de la barra, dependerá de la adherencia matriz/fibra.

*Kumahara et al., (1993)*, investigaron sobre la influencia de temperaturas elevadas en la resistencia a tracción de las barras de CFRP, viendo que:

“las barras de CFRP presentan una reducción de su resistencia alrededor de 0 a 20% de su resistencia inicial, ante la exposición prolongada a una temperatura de 250 °C”.

Muchas propiedades que están afectadas directamente por la transferencia de tensiones a través de la resina polimérica, como lo son el comportamiento a flexión y cortante, se reducen significativamente a temperaturas cercanas a la  $T_g$  (*Wang y Evans, 1995*).



**Figura 2.9** Ensayos de resistencia a tracción sometidas a diferentes temperaturas en barras de CFRP. *Wang et al., 2007.*

*Micelli y nanni, (2004)*, investigaron sobre la influencia de diferentes gradientes de temperaturas (de -18 a 49 °C), radiación U.V., humedad relativa y ciclos de hielo/deshielo, sobre el comportamiento mecánico de los distintos tipos de barras de CFRP, viendo que:

“las barras de CFRP no presentan disminución alguna de sus propiedades mecánicas, tanto de resistencia a tracción como resistencia a cortante transversal, frente a los ensayos de envejecimiento acelerado realizados en el presente estudio”.

*Kollár y Springer et al., (2003)*, dicen que por las condiciones de diseño de los hormigones armados estructurales con barras de CFRP, estas deberán poseer una Tg mayor a 30 °C de la temperatura máxima a la que va a ser expuesta dicha estructura.

*Y. C. Wang et al., (2007)*, investigaron sobre el comportamiento mecánico de barras de CFRP sometidas a altas temperaturas. Fueron realizados ensayos a tracción de barras de CFRP a temperaturas de 20, 100, 200, 400 y 600 °C (**Figura 2.9**), analizando la degradación de la resistencia traccional y módulo elástico (**Tabla 2.7**). Concluyendo con la afirmación (**Figura 2.10**):

“las barras de CFRP presentan una temperatura crítica de uso alrededor de 350 °C”.

En la **Figura 2.11** se puede ver la comparativa de los resultados obtenidos por *Saafi, (2002)*, en la investigación que hizo sobre el comportamiento mecánico de diferentes barras de CFRP, con los obtenidos por *Wang et al., (2007)*. En la gráfica se puede ver que los datos que obtuvo *Saafi, (2002)*, para barras de CFRP presentaron mejor comportamiento a tracción hasta temperaturas de 300 °C; sin embargo, a temperaturas mayores se puede observar una mayor reducción de su resistencia a tracción. La respuesta es similar en las dos investigaciones en lo que tiene que ver con el comportamiento del módulo elástico.

Diámetro (mm)	Temp. (°C)	Resist. (MPa)	Módulo (GPa)
9,5	20	1.260	121,41
	20	1.280	126,50
	100	993,21	105,10
	100	1.283,62	132,73
	200	702,79	107,51
	200	763,05	107,27
	400	371,73	-
	400	387,70	-
	600	132,86	44,68
	600	9,44	-

**Tabla 2.7** Datos de los ensayos de resistencia a tracción a diferentes rangos de temperaturas en barras de CFRP. Adaptado de *Wang et al., 2007*.

La larga exposición de las barras de CFRP, en presencia de ambientes con temperaturas que rondan o sean menores a los 0 °C, producirá los siguientes cambios mecánicos: aumento de las resistencias a tracción y del módulo elástico, fatiga, flexión y fluencia. A la vez, produce una disminución de la deformación, de la resistencia a impacto, a fractura y compresión, y del C.T.E. de las barras de CFRP. Estos cambios serán producidos por la estabilidad molecular proporcionada por tales temperaturas (*Capítulo 2, apart 2.2.1*) (*Allred, 1984; GangaRao et al., 1995; Kelen, 1983*).

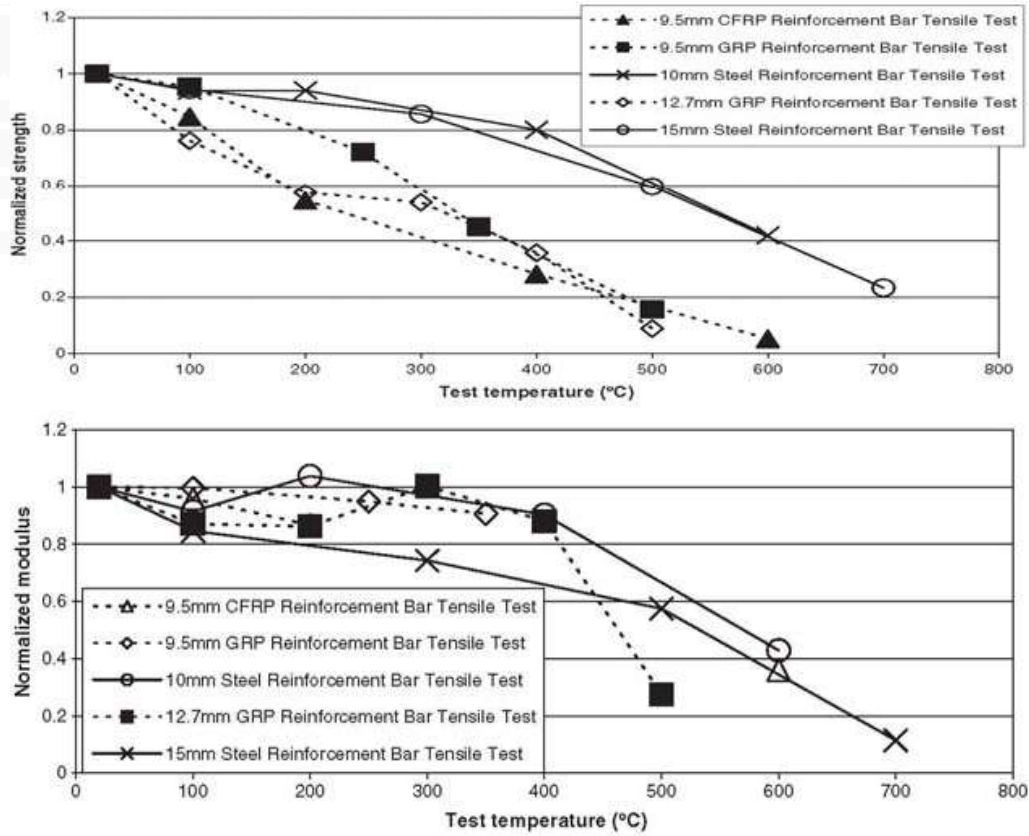


Figura 2.10 Comportamiento mecánico de la exposición a diferentes temperaturas de las barras de CFRP, GFRP y acero. Wang et al., 2007.

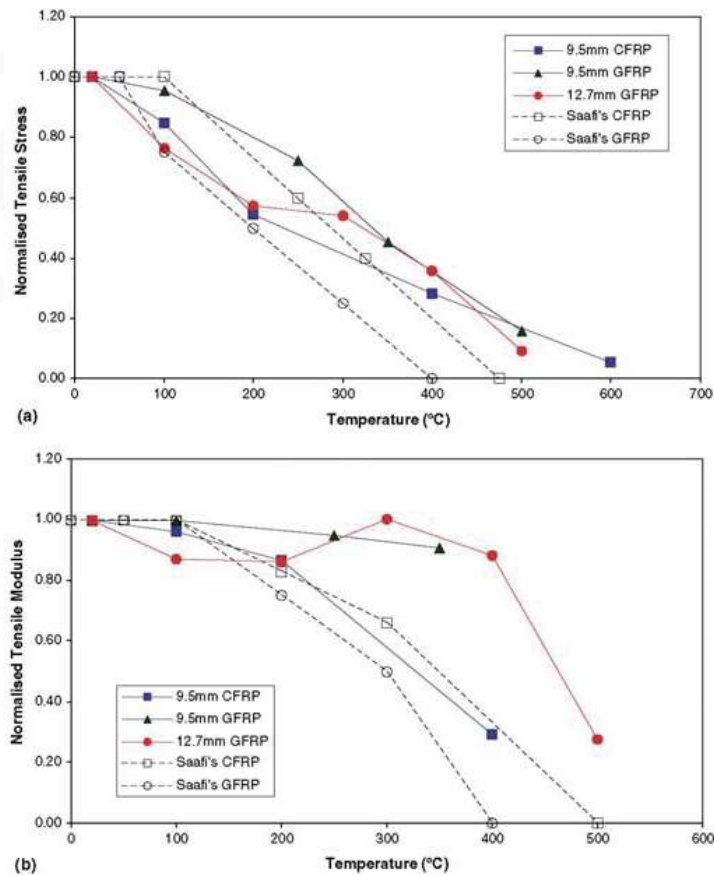


Figura 2.11 Comparación de comportamientos mecánicos a) R. Tracción, b) Módulo elástico frente a diferentes temperaturas en barras de CFRP, GFRP y acero. Y. C. Wang et al., 2007.

## 2.4 Adherencia Hormigón-Armado

Será un factor importante para la eficiencia estructural, es necesaria una correcta adherencia entre armadura-hormigón, por mucho que el armado sea muy resistente. Para un correcto funcionamiento de forma conjunta, la adherencia entre todos los componentes debe ser adecuada. Esto se debe a que, el hormigón genera tensiones cortantes en la superficie de la barra, dando pie a la transmisión de tensiones entre el hormigón y el armado (*V. Calvet, 2014*).

### 2.4.1 Factores influyentes en la adherencia

Muchos parámetros son los que influyen en la adherencia entre el hormigón y su armado. Variará en función de las propiedades del hormigón y del armado, así como también del diseño y proceso de fabricación. Todo esto se verá afectado por el paso del tiempo.

#### 2.4.1.1 Hormigón

En cuanto a la resistencia a compresión, cuando esta aumente en hormigones de altas prestaciones, menos será la longitud de transmisión, pero no afectará a hormigones autocompactantes y hormigones convencionales (*Martín, 2002*).

La rotura por hendimiento se producirá porque el anillo de tracción en el recubrimiento alcanza la resistencia a tracción, por tanto, si la resistencia aumenta, constará más que este rompa y tendrá mejor adherencia (*L. A. Caro, 2012*).

La relación agua/cemento será uno de los parámetros más trascendentes en la adherencia respecto al hormigón, tanto fresco como endurecido. Cuanto más alto sea la relación a/c, menor será la adherencia (*L. A. Caro, 2012*).

La compactación adecuada y uniforme será fundamental en el hormigón, ganando adherencia con esto (*Marshall, 1949*).

La retracción provocará aparición de tensiones de compresión en el interior del hormigón y favorecerán su adherencia (*Vandewalle, 1994*).

Cuando la resistencia y calidad de los áridos sea mayor, mejor será su adherencia, ya que estos tienen gran influencia sobre la resistencia a tracción del hormigón (*L. A. Caro, 2012*) y cuanto mayor resistencia a tracción, mejor será la adherencia.

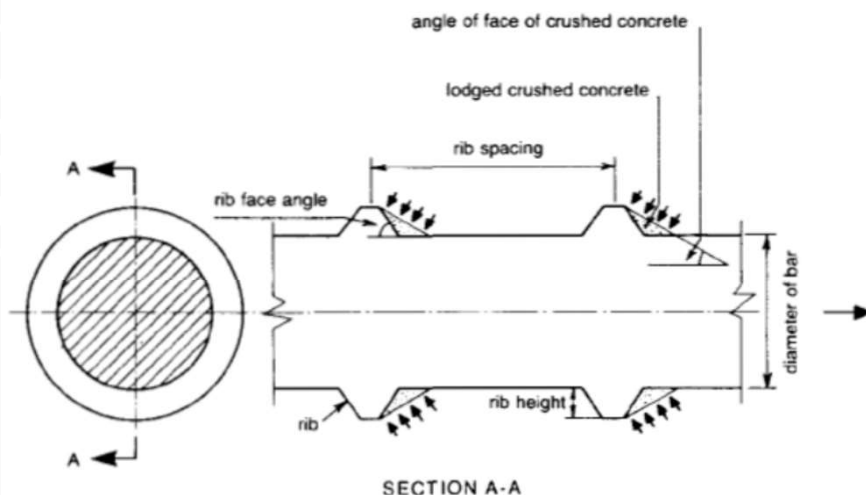
El hormigón al asentar, deja un hueco bajo la armadura donde se producirá exudación, alojándose agua y aire. Por lo tanto, los hormigones con un menor asentamiento y por lo tanto mayor consistencia, darán mejores resultados en cuanto adherencia (*M. C. Delgado, 2008*).

#### 2.4.1.2 Armadura

*Russell y Burns (1997)* realizaron ensayos para comprobar si armaduras de 15.2 mm podrían transmitir la fuerza necesaria en una longitud aceptable. Se observa en los resultados, que la longitud de transmisión media en armaduras de 12.7 mm de diámetro era de 1008 mm, por lo que se podrá concluir que, a mayor diámetro, mayor adherencia.

Las corrugas superficiales de las armaduras serán fundamentales en la adherencia hormigón/armadura, por lo que, combinando bien la altura de corruga, separación entre estaca y diámetro de barriga de corruga, se pueden conseguir mejores adherencias (**Figura 2.12**) (*M. C. Delgado, 2008*).

*Rehm (1968)*, estudió cuales serían las mejores medidas de corrugas para armaduras, concluyendo que, para la obtención de mayor adherencia hormigón/armado, la relación altura/distancia entre corrugas, debería ser del orden de 0.065. Lo importante será que esta relación oscile entre 0.05 y 0.1, produciéndose la rotura por "splitting", pero si esta relación supera el 0.15, la rotura será por "pullout", ya que el hormigón sería aplastado por la tensión de las corrugas. (*V. Calvet, 2014*).



**Figura 2.12**\_ Geometría de una barra corrugada.

Hay que tener mucho cuidado con la oxidación y corrosión de las armaduras, ya que, del estado de las corrugas, dependerá la transmisión de esfuerzos por parte del hormigón a las barras (*Cairns J., 2006*):

La oxidación será esa fina capa de óxido superficial en las armaduras, lo que ayudará a la adherencia de las armaduras si las dimensiones de corrugas son adecuadas y se pueda evitar una posterior corrosión.

La corrosión ocurrirá por la penetración de iones cloro, dióxido de carbono y oxígeno en el interior del hormigón y contacto con el armado y desestabilizará la capa de óxido encargada de proteger la armadura. Esto reducirá la sección de armadura, menguando la calidad de adherencia hormigón/armadura. Para evitar esto, se podrán usar recubrimientos de resinas epoxy, aunque estas afectaran negativamente a la adherencia.

La plastificación de los armados perjudicará la adherencia de estos con el hormigón (*Bigaj A. J., 1998*).

### 2.4.1.3\_Diseño

Cuanto mayor sea el recubrimiento del hormigón, mayor será la adherencia, por lo que, si se producen fisuras superficiales del hormigón, no se transmitirán de manera tan fácil a la armadura por su grosor, y se pueda provocar hendimiento (*L. A. Caro, 2012*). Con mayores valores de recubrimiento, se podrían producir fallos por "pullout", mientras que con menores valores, las roturas se producirán por "splitting". Un recubrimiento razonable sería la de tres veces el diámetro de la armadura, siendo suficiente para evitar fallos por "splitting" (*M. C. Delgado, 2008*).

Las grietas producidas longitudinalmente entre armaduras del hormigón serán debidas a la energía que este pueda absorber, por lo que, cuanto mayor sea esta separación entre los redondos, más energía se necesita para llegara fracturar el hormigón y mejor será su adherencia hormigón/armado (*McCabe; Darwin, 1992*). la separación óptima para evitar esta fracturación estará entre 3 y 3.5 veces el diámetro de la barra (*Cousins et al., 1994*).

La adherencia mejorará en aquellos armados en los que se coloque en forma horizontal próxima al fondo den encofrado, pero a su vez, afectará negativamente, el recubrimiento mecánico será menos, lo que disminuirá la adherencia más que la mejora por la posición (*Clark A. P., 1946*).

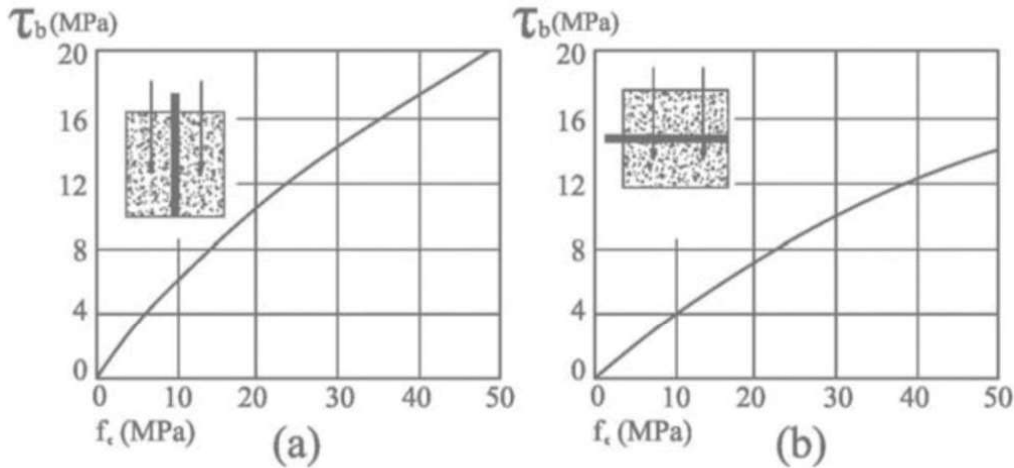
El armado transversal de cosido, mejorará la adherencia ya que aguantará las tensiones radiales que genera el armado en el hormigón, reduciendo la fisuración traccional del hormigón (*V. Calvet, 2014*).



### 2.4.1.4\_Proceso de Fabricación

El curado del hormigón será fundamental para conseguir una buena adherencia, y se necesitará un buen control de este, así como su vibrado al verter el hormigón en el interior del encofrado (*Shing et al., 2000*).

*Martin y Noakowski (1981)*, estudiaron como, un vertido perpendicular a las armaduras del hormigón, la adherencia empeorará respecto a un vertido paralelo (**Figura 2.13**).



**Figura 2.13**\_Tensión de adherencia en función a la dirección del vertido a) Vertido paralelo al armado, b) Vertido perpendicular al armado.

### 2.4.1.5\_Temperatura

Al someterse a altas temperaturas la estructura, la adherencia menguará, sobre todo a partir de los 400 °C (*Diederichs U., 1981*), al contrario que con temperaturas frías, que su adherencia mejorará (*Van der Veen, 1992*).

### 2.4.2\_Adherencia hormigón-barras de Acero

La adherencia hormigón-acero se realizará de forma física y rozamiento. Cuando el enlace químico que une estos dos elementos se rompe, la adherencia pasa a ser exclusivamente por rozamiento, por transferencia a las corrugas de las barras (*I. Montava, 2017*).

La adherencia de forma física se producirá por fuerzas capilares superficiales del contacto entre en acero-hormigón. En contra, la adherencia mecánica por rozamiento se producirá por la presión producida del hormigón que se encuentra entre las corrugas a estas por acuñamiento.

Se puede ver la adherencia con barras corrugadas de acero en la **Figura 2.14**.

**TABLA 8.1**  
**CONDICIONES DE ADHERENCIA**

<i>Diámetro nominal <math>\varnothing</math> (mm)</i>	<i>Tensión media de adherencia <math>\tau_m</math> (N/mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Tensión máxima de adherencia <math>\tau_{max}</math> (N/mm<sup>2</sup>)</i>
Inferior a 8	$\geq 6,88$	$\geq 11,22$
De 8 a 32	$\geq 7,84 - 0,12 \varnothing$	$\geq 12,74 - 0,19 \varnothing$
Superior a 32	$\geq 4,00$	$\geq 6,66$

**Figura 2.14**\_Adherencia Hormigón-Acero

### 2.4.3 Adherencia Hormigón-barras de CFRP

Por la gran variedad de barras de CFRP que se fabrican hoy en día, será complicado fijar un comportamiento de adherencia común para todas. Por lo que, no se podrá hablar de un único comportamiento relativo a este tipo de redondos.

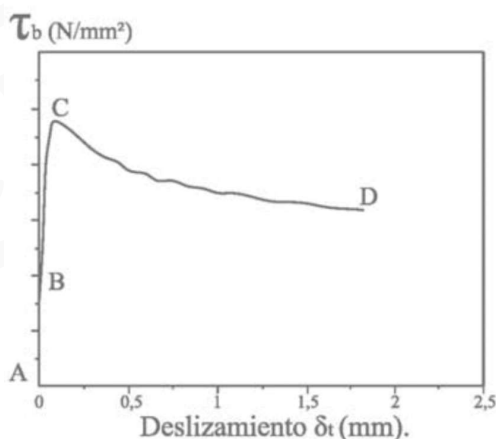
Para analizar los diferentes comportamientos de adherencia de las barras de CFRP, se deberá realizar un estudio de los tipos de barras que existen en el grupo (**Figura 2.15**).



**Figura 2.15** Esquema según geometría superficial de las barras de CFRP.

#### 2.4.3.1 Barras lisas

Numerosos son los estudios que se han realizado sobre la adherencia de barras de CFRP con hormigón mediante ensayos del tipo pullout. En la **Figura 2.16** se puede ver como se comporta la adherencia de este tipo de barras lisas de CFRP, habiéndose obtenido estos resultados en laboratorio.

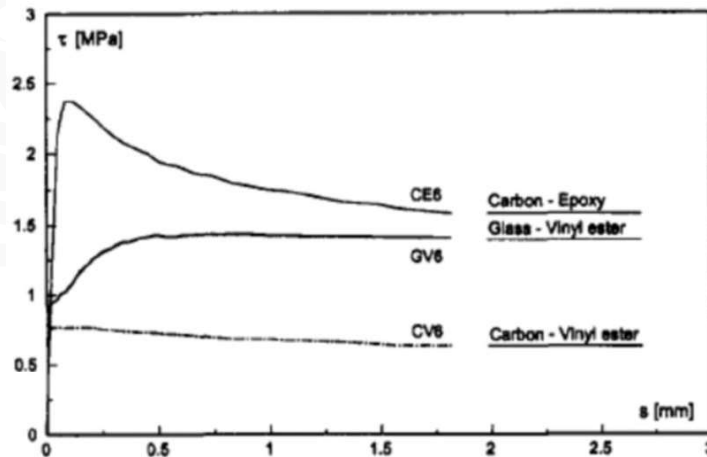


**Figura 2.16** Gráfica de la tensión adherente/desplazamiento barra lisa de CFRP-hormigón.

Serán dos las fases de este tipo de ensayos:

- Fase 1 (Tramo AB): la barra estará adherida de forma química al hormigón por unos momentos, durante los que no habrán desplazamientos barra-hormigón.
- Fase 2 (Tramo BC-CF): Dejará de existir la adherencia química, sustituyéndose por fricción, debido a la rugosidad superficial de la barra y hormigón. En el tramo BC se producirá el primer deslizamiento de la barra como consecuencia del aumento de tensión de adherencia hasta llegar a la máxima.

Por los ensayos realizados, las barras lisas de CFRP no oponen gran resistencia frente a deslizamiento y su comportamiento adherente será muy malo, aunque, dentro de este grupo, las barras lisas de CFRP serán las que más adherencia muestren (**Figura 2.17**).

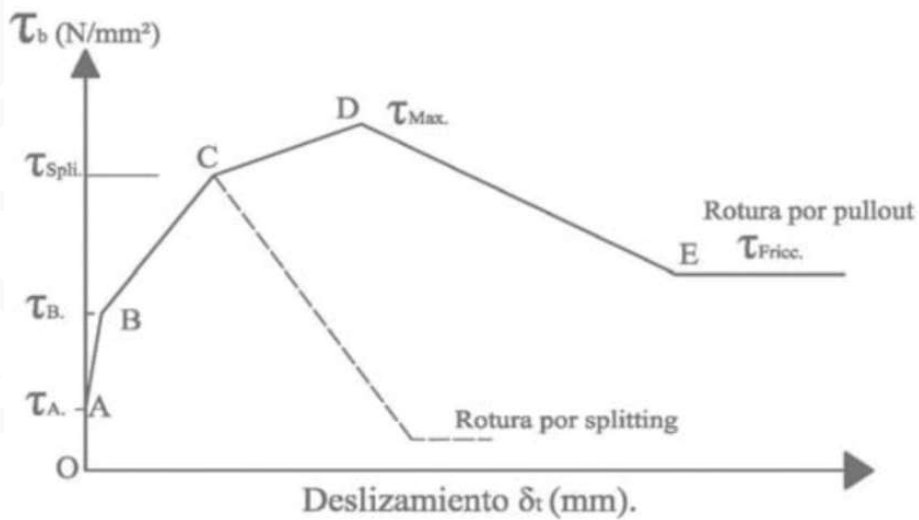


**Figura 2.17** Relación tensión adherente/deslizamiento de las diferentes barras de CFRP y hormigón.

La rotura será causada por las tensiones traccionales de la barra, sin producirse fisuraciones en el hormigón, ya que estas tensiones serán débiles todavía (V. Calvet, 2014).

2.4.3.2 Barras corrugadas o con algún tratamiento superficial

En la **Figura 2.18** se muestra, como es el comportamiento adherente general de estas barras con el hormigón, datos obtenidos con ensayos del tipo pullout.



**Figura 2.18** Relación tensión adherente/deslizamiento entre barras corrugadas de CFRP-hormigón.

En el primer tramo, OA, la adherencia se producirá por razones químicas, no habiendo deslizamiento. En esta fase, las barras corrugadas arenadas, serán las que mejor adherencia química presente (**Tabla 2.8**).

Tipo de barra	Tensión adherente (MPa)
<b>Corrugadas</b>	2,5 a 5,0
<b>Con recubrimiento de arena</b>	3,5 a 12,0
<b>Con hélice adherida</b>	0,5 a 2,5
<b>Con hélice adherida y arena</b>	4

**Tabla 2.8** Tensiones de adherencia de las barras corrugadas o con algún tipo de tratamiento superficial.

En el segundo tramo, AB, es cuando se produce la pérdida de adherencia de manera química por las tensiones producidas en la barra, lo que provocará deslizamiento. Se puede ver en la **Tabla 2.9** las reacciones de los distintos tipos de barras analizadas.

Tipo de barra	Mecanismo de adherencia
<b>Corrugadas</b>	Acuñamiento mecánico
<b>Con recubrimiento de arena</b>	Fricción
<b>Con hélice adherida</b>	Acuñamiento mecánico o fricción
<b>Con hélice adherida y arena</b>	Acuñamiento mecánico o fricción

**Tabla 2.9**\_Mecanismos para la adherencia de las barras corrugadas o con algún tipo de tratamiento superficial.

Las barras con recubrimiento de arena serán las que menor desplazamiento presenten en esta fase.

El hormigón alcanzará su máxima resistencia a tracción por las tensiones de adherencia, provocando microfisuras en este, pero, como las barras de CFRP tienen menor resistencia a corte que las de acero, esta microfisuración ocurrirá más tarde.

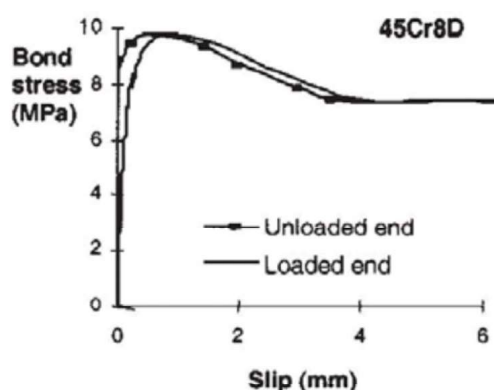
En el tercer tramo, BC, las tensiones y el deslizamiento aumentará en gran proporción, lo que causará una reducción en la adherencia. Siendo las barras con un tratamiento superficial de arena, las que menos deslizamiento presentan, seguidas de las corrugadas. Se ha podido observar, que hasta el final del tramo, los extremos de las barras se mantendrán exentos de deslizamiento (*Archillides et al., 2004; Baena et al., 2009*).

Durante el cuarto tramo, CD, se alcanzará la máxima tensión de adhesión, siempre y cuando el hormigón proporcione el confinamiento suficiente para esto. Por otro lado, los extremos de las barras, sufrirán un desplazamiento relativo y la adherencia variará en función del tipo de barra.

Cuando se haya alcanzado la máxima tensión de adhesión, se dará lugar a la rotura, la cual, ocurrirá de 4 maneras diferentes: corte del hormigón, corte de las corrugas de la barra, por combinación de las anteriores o por aplastamiento de la barra.

En el tramo DE dependerá del modo de rotura del tramo anterior. Siendo la rotura por corte de hormigón, el mecanismo de acuñamiento que causa esta rotura pasa a ser fricción, el cual dependerá de la rugosidad superficial (*Nanni et al., 1995*). Si se produjese la rotura por medio combinado, la adherencia se producirá por combinación de acuñamiento y fricción (*Achillides et al., 2004*).

Como conclusión, se puede decir, que dentro del espectro de barras de CFRP, las arenadas son las que mayor adherencia presentan (*V. Calvet, 2014*). Se puede ver en la **Figura 2.19** el comportamiento adherente de una barra de CFRP con el hormigón.



**Figura 2.19**\_Comportamiento de la adhesión barra CFRP-hormigón.

## 2.5\_Coste barras CFRP vs Coste barras de Acero

Se han analizado los costes de los armados de barras de CFRP y barras de acero, comparándolos entre si y de lo que supondría realizar una estructura con cada tipo, teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas.

Los armados con barras de CFRP, tienen precios elevados por los procesos de producción, siendo esos muy largos y costosos, tardando semanas o incluso meses en transformar los polímeros sintéticos en armados. Dependerá de las resistencias que se requieran adaptándose a las exigencias que se necesiten.

Propiedades		Fibra de carbono	Acero
<b>Resistencia a tracción (MPa)</b>		600-3690	483-690
<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>		450	460
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>		1,6	7,85
<b>Coef. expansión térmica (x10<sup>-6</sup>/°C)</b>	Longitudinal	-9 a 0	11
	Transversal	74 a 104	11
<b>Resistencia corrosión</b>		No corrosivo	corrosivo
<b>Precio (€/Kg)</b>		16	0,81

**Tabla 2.10** Propiedades y Costes de las barras de CFRP y Acero.

En la actualidad, el kilo de fibra de carbono tiene un coste entorno a 20 veces mayor que el kilo de acero. Esto podría cambiar en los próximos años, ya que se está investigando a cerca del proceso de fabricación, suponiendo la reducción de costes a un balance 2 (CFRP) a 1 (Acero) (*H. Sarrión, 2018*).

A parte de hablar directamente del coste, en cuanto a propiedades, los armados de CFRP tienen mejores resistencias a tracción que el acero, por lo que se necesitará un menor número de barras y de menor diámetro. Por otra parte, el peso de la fibra de carbono es mucho menos a la del acero, por lo que el peso propio de la estructura se reducirá y con ello, se necesitarán menos elementos para esta y no se necesitará una maquinaria pesada para su transporte por esta ligereza, reduciendo costes. Las resistencias a agentes externos de las barras de CFRP son mayores a las del acero, por lo que se requerirá menor mantenimiento a lo largo del tiempo.

En la **Tabla 2.11** se pueden ver los precios de ejecución de algunos refuerzos, para una ejecución con recercados de hormigón, elementos metálicos y CFRP, basándose en la base de datos del generador de precios de la construcción de Cype Ingenieros.

A tenor de los datos de la **Tabla 2.11**, el coste de los refuerzos con CFRP es menor en algunos elementos que los de los recercados de hormigón o perfiles conformados en acero. Para poner un ejemplo de un refuerzo de un pilar, el m<sup>2</sup> con refuerzos metálicos es de 62,37 €, para un recercado de hormigón de 98,69 €, mientras que para CFRP es de 42,59 € por metro.

A todos estos costes, habría que añadirles los mismos de mantenimiento, para un plazo de mínimo 50 años, mucho mayor en el caso de los refuerzos metálicos y de hormigón (*V. González et al., 2017*).

## 2.6 Aspectos Medioambientales

Para poder valorar la sostenibilidad de los productos o procesos de construcción desde criterios medioambientales se deben emplear herramientas basadas en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como son las Declaraciones Ambientales de Productos (DAP), que evalúan, en cada etapa de la vida del producto (desde extracción de la materia prima utilizada para su conformación, hasta la gestión de residuos), la relación de impactos con el potencial calentamiento globalizado, el agotamiento de la capa de ozono, la eutrofización, la formación de oxidantes fotoquímicos, la acidificación, el agotamiento de recursos y la

producción de residuos (V. González et al., 2017).

TIPO REFUERZO	DESCRIPCIÓN UNIDAD	COSTES (€)
RECRECIDOS DE HORMIGÓN	ml Refuerzo de pilar de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón armado.	98,69
	ml Refuerzo de pilar de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón proyectado.	101,42
	ml Refuerzo de viga descolgada de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón armado.	43,93
	ml Refuerzo de viga descolgada de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón armado.	19,37
ELEMENTOS METÁLICOS	ml Refuerzo de pilar de hormigón armado, con perfiles metálicos empresillados.	62,37
	Ud. Refuerzo de base y capitel de pilar de hormigón armado, con perfiles metálicos.	104,98
	ml Refuerzo de viga o vigueta de hormigón armado, con perfiles metálicos.	15,57
CFRP	ml Refuerzo de muro o pilar de hormigón armado, con laminado de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	42,14
	m <sup>2</sup> Zunchado de pilar de hormigón armado, con hoja de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	90,29
	ml Refuerzo de vigas y viguetas, con laminado de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	41,59
	m <sup>2</sup> Refuerzo a cortante de vigas, con hoja de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	90,29

**Tabla 2.11** Precios de diferentes refuerzos extraídos del generador de precios de la construcción de Cype Ingenieros (V. González et al., 2017).

Actualmente, no existe DAP de refuerzos de CFRP par ael sector de la construcción, aunque se pueden encontrar aproximaciones a las mismas en la industria de los aerogeneradores (Rivarola et al., 2011), o en la industria de la automoción (Muñoz et al., 2008).

Por la carencia de estos datos sobre el ACV de los laminados de CFRP (Pereira, 2015), los análisis de costes medioambientales se realizarán en base a un único parámetro, el consume energético en todas las fases de fabricación del material, hasta el tratamiento de residuos y reciclado al final de toda su vida útil (V. González et al., 2017).

La primera etapa del análisis es la extracción de las materias primas y la fabricación de los elementos de CFRP. Se puede observar en la **Tabla 2.12** los datos de la energía primaria consumida por Kg de estas materias primas en la fase de producción (Song et al. 2009).

Como se ve en la **Tabla 2.12**, la energía primaria para la extracción de materia prima para la producción de resinas de poliéster y epoxi utilizadas para la fabricación de materiales compuestos es baja, en cambio, la conformación de fibras de carbono, presenta una gran intensidad de consumo energético (183-286 MJ/Kg). Los procesos del automodelado en autoclave, es el que más energía consume y el menor, el de pultrusión (3.1 MJ/Kg). En el primer proceso del análisis de la etapa siguiente, en aplicación, la gran ligereza de la fibra de carbono, genera disminuciones significativas para la energía utilizada en el transporte de las mismas, frente a materiales más pesados como el acero. Pudiendo cuantificarse una disminución de peso entre el 60% - 80% de los materiales de CFRP frente a los de acero, por lo que, en esta fase de su ciclo de vida, ambos materiales se encontrarán igualados en cuando al consumo energético (V. González et al., 2017).

Las deducciones del consumo de energía del transporte, se realizará de acuerdo a la publicación CIEMAT (Lago 2007), para un vehículo de gama baja como referencia, ya que se pretende hacer un estudio comparativo, aún no siendo el transporte más adecuado. Contando con que la gasolina tiene un poder calorífico de 42,9 MJ/Kg y que el consumo es de 0.0731 l/km = 0.0624 kg/km y restringiendo la capacidad del transporte a un 80% de su capacidad máxima de carga, 489 kg sobre el vehículo de

referencia, su energía necesaria para el transporte de 1 Kg de material sería  $6.85 \cdot 10^{-3}$  MJ/kg · km.

$$(42.9 \text{ MJ/kg} \cdot 0.0624 \text{ kg/km}) / (0.8 \cdot 489 \text{ kg}) = 6.85 \cdot 10^{-3} \text{ MJ/kg} \cdot \text{km}$$

	Energy intensity (MJ/kg)
<b>Materiales</b>	
<b>Polímeros</b>	
Poliéster	69-78
Epoxi	76-80
LDPE	65-92
PP	72-112
PVC	53-80
PS	71-118
PC	80-115
<b>Fibras</b>	
De vidrio	13-32
De carbono	183-286
<b>Metales</b>	
Aluminio	196-257
Acero	30-60
Acero inoxidable	110-210
Cobre	95-115
Zinc	67-73
Acero de fundición	60-260
<b>Métodos de fabricación</b>	
Moldeo en autoclave	21.9
Moldeo por Transferencia de Resina	12.8
Moldeo por infusión de resina asistida por vacío	10.2
Presión en frío	11.8
Pultrusion	3.1
Moldeo por inyección	19

**Tabla 2.12** Energía primaria para la extracción de los diferentes tipos de materiales y la adicional para la fabricación de los elementos compuestos (Song et al., 2009).

Por con secuencia, en un primer estudio de consumo energético referido solo al transporte, si comparamos la ejecución de refuerzos par el mismo edificio con CFRP y con acero, sabiendo que en peso ambos refuerzos se encuentran en relación 1/8 (CFRP/acero), el coste de la energía de forma unitaria de transporte de la fibra de carbono es de  $6.85 \cdot 10^{-3}$  MJ/kg · km frente a  $34.22 \cdot 10^{-3}$  MJ/kg · km del acero. Cuanto más distancia entre lugar de producción y el de colocación, más compensará la diferencia energética entre ambos esfuerzos y sus ciclos de vida (V. González et al., 2017).

Refiriéndose a la fase de fin de vida del producto, los residuos producidos y el reciclado de los materiales compuestos fibra de carbono/epoxi, es preciso destacar que, actualmenten es una industria en auge e interesante para productores, atendiendo al elevado coste energético y económico de la producción de fibra de carbono, siendo los procesos considerados en los recientes estudios los que relacionan a continuación (V. González et al., 2017):

\_Reciclados con microondas (Jiang et al. 2015). El método muestra el potencial de la fibra de carbono reciclada mediante la irradiación de microondas.

\_Reciclado por "solvolisis" (Keith et al., 2016). Método que se usa para degradar las resinas de dos variantes diferentes de fibra de carbono con bases epoxi usando mezclas de acetona y agua a temperaturas de 320° C, el proceso requerirá un consumo energético de 19 MJ/Kg de fibra de carbono, pero no es un proceso optimizado que muestra gran potencial para el futuro.

\_Extracción mecánica (Howarth et al., 2014). Con energía eléctrica de fresado como opción de

reciclaje de compuestos de fibra de carbono, llegando a un consumo energético de 2.03 MJ/Kg.

Se va a mostrar un cálculo en el que se compara la energía necesaria en los ciclos de vida de los refuerzos de CFRP frente a los refuerzos de chapas de acero. En este estudio se incluyen las fases de reciclado y recuperación del material, optimizando al máximo los beneficios energéticos en el final de la vida de los refuerzos de CFRP (V. González et al., 2017).

Etapas	Refuerzos con CFRP (MJ/kg)	Refuerzo acero (MJ/kg)
Obtención materiales	286	60
Manufactura	3,1	3,1
Transportes (500 km)	3,43	3,43
Aplicación <sup>(1)</sup>	--	--
Mantenimiento <sup>(2)</sup>	0	31,16
Extracción (desmontado)	2,03	2,03
Reciclaje	19	8,6 <sup>(3)</sup>
Material recuperado	-286	-60
<b>Total final vida útil</b>	<b>27,56</b>	<b>47,21</b>

(1) Se estima un consumo energético similar aunque los refuerzos con CFRP necesitan menos medios auxiliares

(2) Supuesta una vida útil de 30 años, repintado cada 10 años

(3) Osorio 2011.

**Tabla 2.13** \_Estudio comparativo entre los refuerzos de CFRP y acero (V. González et al., 2017).

Con la relación 1/8 anteriormente indicada de los refuerzos (CFRP/acero) el consumo energético del refuerzo de acero final es de 377.68 MJ/kg, es decir, 13.7 veces mayor al de CFRP. Por lo que, desde el punto de vista del consumo energético, se ha puesto de manifiesto la gran ventaja de los refuerzos con materiales compuestos de CFRP en contrapartida a los de acero (V. González et al., 2017).

## 2.7 Aspectos Sociales

Este aspecto no puede ser eludido, ya que, es muy relevante en los análisis de sostenibilidad en operaciones de construcción o refuerzo estructural, la disminución del impacto en las personas que se puede conseguir con los usos de elementos de CFRP, tanto en los usuarios finales de los edificios e infraestructuras durante el proceso de ejecución como en los operadores que lo ejecutan.

Para edificación de nueva obra, las construcciones típicas conformadas en hormigón armado de acero, hasta la mitad del hormigón es llegado a utilizar para la protección de las armaduras de acero, por lo que, hasta el 60% de la estructura es peso muerto final. Esto influiría en, menores estructuras reforzándose con CFRP, por lo que no se necesitaría tanta cantidad de medios auxiliares y se necesitarían menores zonas de acopios de materiales.

Las obras tienen un menor impacto en el vecindario, reduciendo la contaminación acústica y empeoramiento de la calidad de aire, ya que se producirá un menor volumen de partículas en suspensión y polvo. La producción de residuos será menor, ya que, los embalajes son de un volumen reducido y reciclables.

Las soluciones de barras/refuerzos de CFRP prácticamente no necesitan mantenimiento, son resistentes a la corrosión y a los ambientes agresivos, por lo que los costes de conservación a comunidades de vecinos y administración serán menores.

A parte, por su ligereza y facilidad de montaje, se reduce el número de riesgos laborales por parte de trabajadores. Las obras serán más seguras, con plazos de ejecución menores, en las que trabajan operarios muy cualificados y más concienciados respecto al tema de la seguridad y calidad de ejecución.







# CAPÍTULO 3

## Caso de Estudio de Construcción en la Costa Mediterránea con problemas de Corrosión en armaduras de acero.

La corrosión es la causa más frecuente de patología en estructuras de hormigón armado y pretensadas es zonas costeras, esto es importante en países como España con gran cantidad de kilómetros de costa.

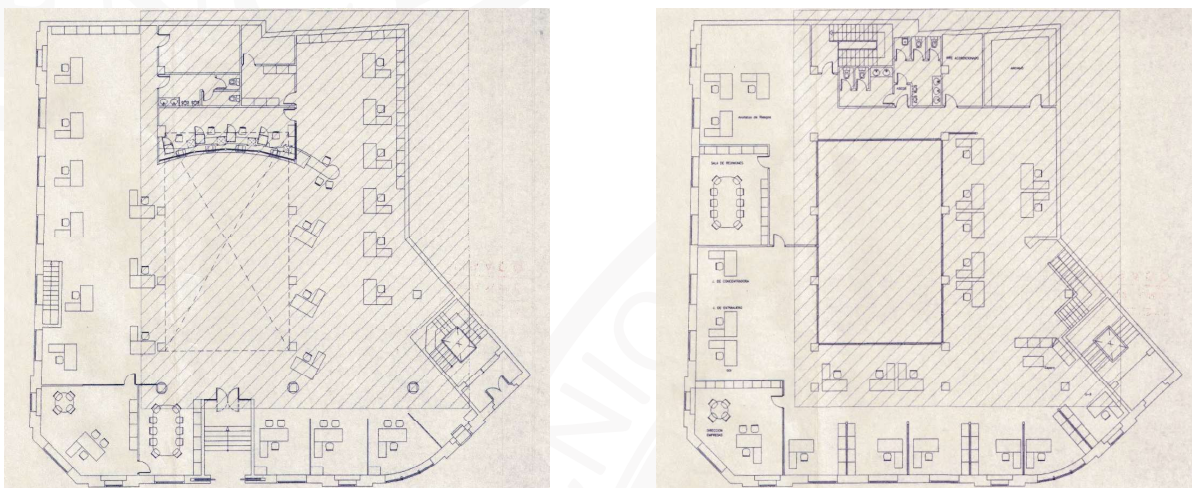
La instrucción español EHE-08 utiliza una clasificación en para los ambientes que se define por clases generales de exposición, vienen referidos a la relación con la corrosión en armaduras y clases relacionadas con el daño en hormigones. La clase III correspondería a exposición marina, existiendo 3 subdivisiones: IIIa para exposiciones marinas aéreas, IIIb exposiciones marinas sumergidas y IIIc exposiciones en zonas de carrera de mareas y zonas de salpicaduras.

### 3.1 Aspectos generales de la construcción estudiada

El caso de estudio para el trabajo, está situado en una localidad de la costa mediterránea, la cual, es clasificado en zona III, por pertenecer a una zona con exposición marina del tipo a, es decir, Ambiente Marino Aéreo (IIIa).

Se trata de un edificio destinado a locales y oficinas, compuesto por 6 plantas sobre rasante, dos de estas, están ocupadas por locales y las 4 superiores a oficinas.

La cimentación se supone se ha realizado mediante zapatas aisladas de hormigón armado en acero, pilares de hormigón armada en acero de sección cuadrada, vigas de cuelgue igualmente conformadas en hormigón armado de acero y forjados de losas macizas de 12 cm de espesor.



**Figura 3.1** Plantas caso estudiado. Izquierda Planta Baja. Derecha Planta Primera/Tipo.

La edificación ha sufrido de problemas generales de corrosión en las armaduras y elementos de acero en la totalidad de su estructura Tanto en elementos estructurales horizontales como verticales, gran parte del acero esta al aire libre, habiendo habido un primer desprendimiento del recubrimiento mecánico de hormigón ("*spalling*") y una posterior reducción de la sección transversal de gran parte de las barras de acero.



**Figura 3.2**\_Spalling del recubrimiento mecánico de las armaduras de acero en forjado.

Tanto en la **Figura 3.2** como en la **Figura 3.3** se ve claramente como por el aumento del volumen de las barras de acero por una oxidación, ha reventado toda la cara anterior de protección mecánica de hormigón. Muy probablemente y analizando las imágenes (**Figura 3.2** y **Figura 3.3**) el anteriormente mencionado recubrimiento mecánico de hormigón de las armaduras de acero, era insuficiente y sumando este primer problema de ejecución o cálculo y posible mala calidad del hormigón, se ha producido la oxidación de las barras, terminando por producirse el fenómeno nombrado de "*spalling*".



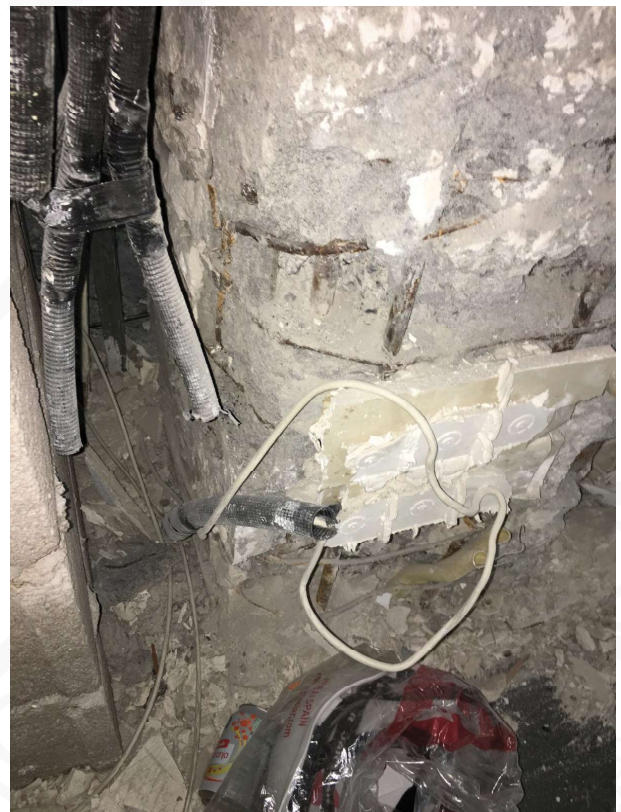
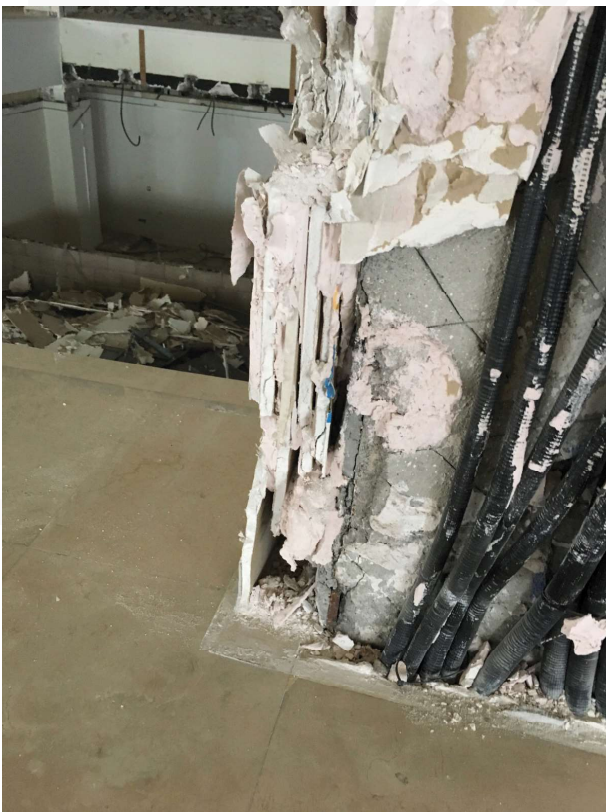
**Figura 3.3**\_Spalling del recubrimiento mecánico de las armaduras de acero en forjado.

En los elementos verticales estructurales, se pueden observar también, grandes problemas de corrosión y pérdida de sección transversal de armaduras, como se puede ver en las **Figura 3.4, 3.5 y 3.6**.

Lo primero que se pierde en las barras de acero por la corrosión y desarticula todo el sistema de trabajo del hormigón armado, son las corrugas. En la **Figura 3.5 y Figura 3.6** se observa como las barras son totalmente cilíndricas, sin corruga alguna por culpa de la corrosión. Lo que ocurre con esto, es que ambos materiales no trabajen conjuntamente, ya que, el hormigón es incapaz de transmitir las cargas al armado, "patinando" la barra dentro del hormigón y únicamente podrán transmitirse gracias al cosido de los estribos.



**Figura 3.4**\_Corrosión y pérdida de sección en armaduras de acero de los pilares.



**Figura 3.5 y Figura 3.6**\_Corrosión y pérdida de sección en armaduras de acero de los pilares.

### 3.2\_Puebas técnicas de la construcción estudiada

Tras el desmontaje-demolición de los elementos de terminación y acabado existentes en el local estudiado, se ha dejado al descubierto los elementos estructurales verticales que componen la estructura portante del edificio, contenida en las plantas del local.

Al realizar dejar al descubierto la estructura, se puede observar a simple vista el estado de estos elementos. A parte, se ha visto que la estructura ya fue ensayada anteriormente por extracción de probetas del hormigón de los pilares.

Por todo lo anterior unido a la presencia de tuberías metálicas en la zona del interior de los cercos en pilares, aparición de multitud de refuerzos de empresillado en diversos pilares y plantas, el estado aparente, multitud de capas de yeso, mortero sobre el fuste, la falta de conexión entre los empresillados y pilares de hormigón, parece necesario analizar el estado portante de ese momento de la estructura existente, analizando los refuerzos existentes, y evaluar cuantitativamente y cualitativamente el hormigón del núcleo de los pilares.

Por todo ello, se propone realizar los ensayos de caracterización necesarios para tener la información necesaria para evaluar el estado real estructural.

Para esta investigación se efectúan los siguientes ensayos:

\_Ensayos No Destructivos:

Estudio mediante ultrasonidos en 16 pilares en las plantas 3-6 ambas inclusive.

\_Ensayos Destructivos:

Extracción de 11 probetas testigo en las plantas 3-6 ambas inclusive. Se procedió al inmediato relleno del hueco con mortero reparador.

#### 3.2.1\_Ultrasonidos.

Se procedió mediante palpadores a la medición de la velocidad de propagación de una onda de sonido en el interior del hormigón para verificar su calidad interior.

Se realizó un total de 16 ensayos, obteniendo en la mayoría de los mismo una calidad el hormigón regular, tal y como se desprende de la **Tabla 3.1**:

ZONA	ELEMENTO	LONGITUD (CM)	TIEMPO ( $\mu$ S)	VELOCIDAD (M/S) *
Planta Sót. -1	ENSAYO 1	50	178,4	2802,69
	ENSAYO 2	50	179,4	2787,07
	ENSAYO 3	35	128,2	2730,11
	ENSAYO 4	50	182,1	2745,74
	ENSAYO 5	45	161,4	2788,10
	ENSAYO 6	45	167,1	2693,00
	ENSAYO 7	45	172,1	2614,76
	ENSAYO 8	45	166,2	2707,58
	ENSAYO 9	40	141,8	2820,87
	ENSAYO 10	40	165,2	2421,31
	ENSAYO 11	40	153,6	2604,16
	ENSAYO 12	40	166,2	2406,74
	ENSAYO 13	37	123,6	2993,53
	ENSAYO 14	36	141,8	2538,79
	ENSAYO 15	36	152,1	2366,86
	ENSAYO 16	36	142,1	2533,43

**Tabla 3.1**\_Resultados pruebas por ultrasonidos en los diferentes ensayos.

### 3.2.2\_Probetas testigo

Se procedió a la realización de 11 probetas testigo distribuidas en diferentes elementos de las plantas 3-6.

Inicialmente se previó la realización de un testigo nº12 en la cimentación del edificio, en la cimentación del edificio, pero durante la realización de las catas de información en dichos elementos a cargo del personal contratista, no se pudo encontrar un elemento lo suficientemente adecuado para la extracción de dicho testigo, por lo que su realización hubo de ser desestimada.

Los resultados de los mismo se indican en la **Tabla 3.3** y a la hora de valorar los mismos, se debe indicar según la normativa los resultados obtenidos multiplicando por un coeficiente corrector 1,11.

Zona	Elemento	Resistencia (N/mm <sup>2</sup> )
Planta Sexta	Viga	12,50
Planta Sexta	Pilar	14,10
Planta Quinta	Fachada	11,10
Planta Quinta	Forjado	10,00
Planta Quinta	Pilar	11,50
Planta Quinta	Viga	15,50
Planta Cuarta	Viga	19,10
Planta Cuarta	Forjado	12,10
Planta Cuarta	Pilar	12,50
Planta Tercera	Viga	15,20
Planta Tercera	Pilar	8,70

**Tabla 3.2**\_Resultados pruebas por probetas testigo.

### 3.2.3\_Evaluación de resultados de las pruebas

En cuanto a la prueba por ultrasonidos, los resultados no parecen del todo malos, ya que esta nos indica la condición del hormigón. Puede ser imprecisa par hormigones por encima de los 28 días, y hay muchos factores de imprecisión de lecturas, como lo pueden ser recorridos cortes de lectura, colocación de transmisores en la misma cara o la armadura interior .

Es un procedimiento más económico y agresivo para la estructura, pero no puede ser únicamente esta la prueba para determinar un resultado general de la estructura, ya que esta será un método que nos informe sobre las discontinuidades internas del hormigón, tanto por calidad de este, como por caso de grietas, coqueas y fisuras.

Como se puede ver en la **Tabla 3.3**, la mayoría de ensayos da una valoración regular en cuanto a la condición del hormigón, esto se podía presuponer observando in situ la calidad del hormigón (apreciable en la **Figura 3.3** y **Figura 3.4**). No es un hormigón compacto parece un tanto disgregable, contiene numerosos poros y huecos interiores e incluso se puede llegar a intuir la falta de hormigón en el núcleo del pilar, es decir, en el interior volumétrico del interior de los estribos, por irregularidades durante su ejecución.

En cuanto a las probetas testigo, tanto en la primera **Tabla 3.2** con resultados resumidos, como en la **Tabla 3.4**, mucho más completa en cuanto a datos de las zonas estructurales analizadas, se comprueba y afirma la pobre calidad del hormigón utilizado, donde la media de resultados de resistencia es de 12.5 MPa aproximadamente.

La instrucción Española EHE, establece unas resistencias características mínimas del hormigón que trabaja a compresión dependiendo de la clase de exposición.

Zona	Elemento	Longitud (cm.)	Tiempo ( $\mu$ s)	Velocidad (m/s)
PILARES	Pilar 3 Pl. 3	50	178,4	2.802,69
	Pilar 7 Pl. 3	50	179,4	2.787,07
	Pilar 10 Pl. 3	35	128,2	2.730,11
	Pilar 12 Pl. 3	50	182,1	2.745,74
	Pilar 4 Pl. 4	45	161,4	2.788,10
	Pilar 8 Pl. 4	45	167,1	2.693,00
	Pilar 11 Pl. 4	45	172,1	2.614,76
	Pilar 13 Pl. 4	45	166,2	2.707,58
	Pilar 12 Pl. 5	40	141,8	2.820,87
	Pilar 13 Pl. 5	40	165,2	2.421,31
	Pilar 11 Pl. 5	40	153,6	2.604,167
	Pilar 15 Pl. 5	40	166,2	2.406,74
	Pilar 2 Pl. 6	37	123,6	2.993,53
	Pilar 4 Pl. 6	36	141,8	2.538,79
	Pilar 7 Pl. 6	36	152,1	2.366,86
	Pilar 8 Pl. 6	36	142,1	2.533,43

Evaluación la calidad mediante la velocidad de pulso según Agraval y otros.	
Velocidad de pulso m/seg.	Condición del hormigón
Más de 3000	Buena
De 2500 a 3000	Regular
Menos de 2130	Pobre

**Tabla 3.3** Evaluación pruebas por ultrasonidos en los diferentes ensayos.

Variable	Tipo de hormigón	Clase de exposición												
		I	Ila	Ilb	IIla	IIlb	IIlc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
$f_{ck}$	Masa	20	---	---	---	---	---	---	30	30	35	30	30	30
(Mpa)	Armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
mínima	Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

**Figura 3.7** Resistencia característica mínima compatible con requisitos de durabilidad.

El caso estudiado estaría situado en la zona IIIa, con un hormigón armado con barras de acero, por lo que la resistencia característica mínima de este hormigón, debería ser de 30 MPa (**Figura 3.7**), por contra y como hemos indicado antes, los resultados no dan una resistencia media de 12.5 MPa, llegando a un mínimo de 8.7 MPa en una de las probetas.

Esta claro que desde el principio, con la colocación de un hormigón muy pobre en cuanto a resistencias, y una mala ejecución del armado, llegando a haber incluso tuberías metálicas en el interior de algún pilar, son causas muy favorables para la aparición de corrosiones, siendo en mucha mayor medida esta, en zonas costeras.



HO001 - TESTIGOS DE HORMIGON

Clase de prensa		Clase I										
Suma de los refrentados		0.8										
Testigo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Diámetro	cm	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4
Altura	cm	15.26	13.51	15.00	11.48	11.69	14.68	11.71	15.00	16.42	12.46	10.43
Sección	cm <sup>2</sup>	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4	69.4
Volumen	cm <sup>3</sup>	1059	938	1041	797	811	1019	813	1041	1140	865	724
Peso	gr	2752.6	2369.3	2634.5	1956.4	2039.8	2519.2	2105.1	2652.1	2858.0	2124.7	1886.4
CARACTERISTICAS MECANICAS												
Edad del hormgón	días	>28	>28	>28	>28	>28	>28	>28	>28	>28	>28	>28
Densidad	gr/cm <sup>3</sup>	2.60	2.53	2.53	2.45	2.52	2.47	2.59	2.55	2.51	2.46	2.61
Carga de rotura	Tnf	9.07	10.41	8.08	7.50	8.66	11.25	14.30	8.80	9.00	11.30	6.56
Relación alto/diámetro		1.71	1.52	1.68	1.31	1.33	1.65	1.33	1.68	1.83	1.41	1.19
Tensión de rotura	N/mm <sup>2</sup>	12.8	14.7	11.4	10.6	12.2	15.9	20.2	12.4	12.7	16.0	9.3
Factor de esbeltez		0.9768	0.9616	0.9744	0.9448	0.9464	0.9720	0.9464	0.9744	0.9864	0.9528	0.9340
Tensión de rotura corregida	N/mm <sup>2</sup>	12.5	14.1	11.1	10.0	11.5	15.5	19.1	12.1	12.5	15.2	8.7
Tipo de roturas		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Defectos		-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Situación		Viga cualquier 4ª pl.	Pilar 4ª pl.	Muro 3ª pl.	Forjado 3ª pl.	Pilar 3ª pl.	Viga cualquier 3ª pl.	Forjado 2ª pl.	Pilar 2ª pl.	Viga cualquier 2ª pl.	Viga cualquier 1ª pl.	Pilar 1ª pl.

Tabla 3.4\_ Resultados de las probetas testigo ensayadas.



Figura 3.8 y Figura 3.9\_ Estado de pilares

### 3.3\_Presupuesto ejecución material para la adecuación de la estructura dañada

Para todos los problemas que se han comentado anteriormente, se propone un presupuesto real para la adecuar la estructura analizada y hacer habitable la construcción escogida para el casa de estudio (**Figura 3.9**).

Presupuesto que asciende a los 240.798,48 €, lo que supone un enfadadísimo coste para tratar unas patologías, como lo son la corrosión de las armaduras de acero, algo que es muy habitual en toda la costa mediterránea suponiendo millones de euros en reparaciones.

#### PRESUPUESTO Y MEDICIONES

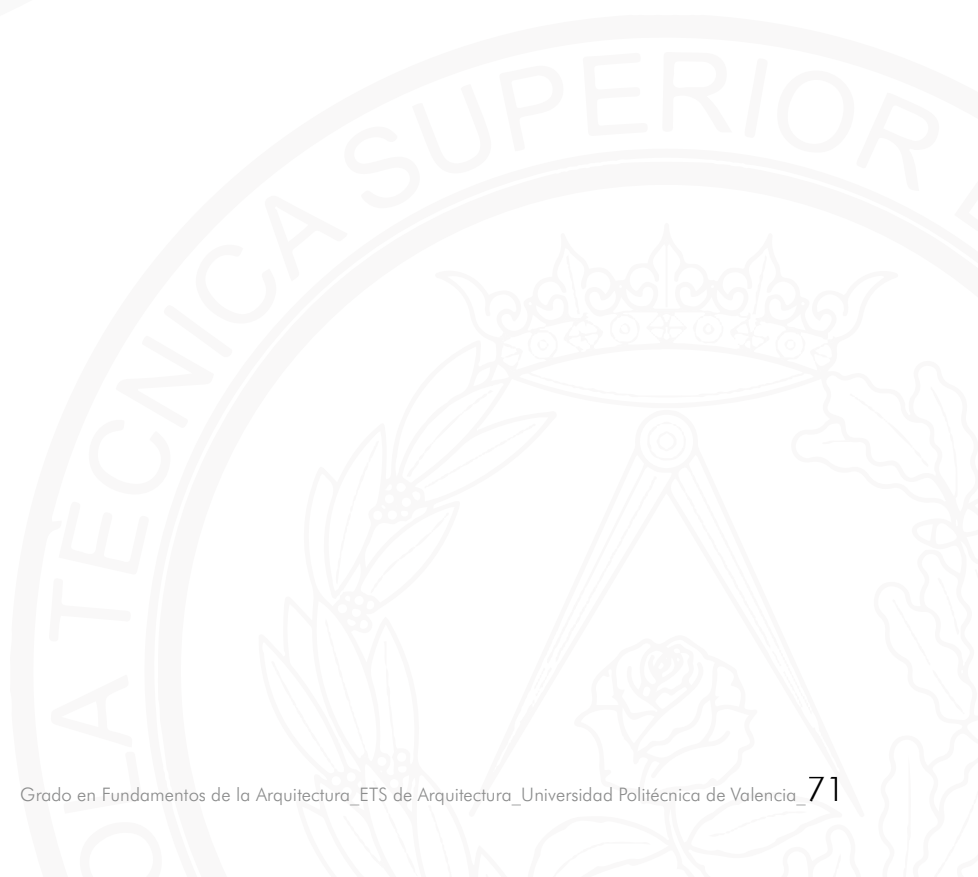
CÓDIGO	RESUMEN	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
<b>02</b>	<b>Presupuesto reparación de pilares</b>							
2.1	<b>saneo de caras de pilares</b>							
	pilares pl baja	36		0,50	7,50	135,00		
	pilares planta alta	36		0,50	3,00	54,00		
	vigas	144		0,40	0,60	34,56		
		144	0,30	0,40		17,28		
						240,84	33,48	8.063,32
2.2	<b>m3 de excavacion manual</b>							
	base de pilares	7	2,50	2,50	3,00	131,25		
						131,25	79,26	10.402,88
2.3	<b>kg de acero</b>							
	zapatas	7	124,00			868,00		
	caras de pilar	56	1,50		1,57	131,88		
		56	7,50		1,57	659,40		
		56	2,80		1,57	246,18		
	planta alta	56	2,80		1,57	246,18		
	estribos	560	2,10		0,39	458,64		
	capiteles	18	100,00			1.800,00		
						4.410,28	5,76	25.403,21
2.4	<b>m3 de mortero de geolite magma incluso encofrado</b>							
	pilares planta baja	28	7,50	0,55	0,10	11,55		
	pilares planta alta	28	2,80	0,55	0,10	4,31		
	CAPITELES	18	1,00	1,00	0,60	10,80		
	a deducir	-18	0,50	0,50	0,60	-2,70		
		-72	0,30	0,25	0,60	-3,24		
						20,72	4.621,28	95.752,92
2.5	<b>ud de ejecucion de taladros</b>							
	paso de forjados	7	8,00			56,00		
	conexion vigas	56	6,00			336,00		
	conexion zapatas	7	44,00			308,00		
						700,00	20,66	14.462,00
2.6	<b>reparacion con sistema de fibra de carbono</b>							
	planta baj	8	0,50		7,50	30,00		
	planta alta	8	0,80		3,00	19,20		
	vigas	16	0,50		1,30	10,40		
						59,60	414,49	24.703,60
2.7	<b>m3 de hgon en zapatas</b>							
	7	7	1,80	1,80	0,80	18,14		
						18,14	360,61	6.541,47
	<b>TOTAL 02.....</b>							<b>185.329,40</b>
	<b>TOTAL.....</b>							<b>185.329,40</b>

#### RESUMEN DE PRESUPUESTO

CAPÍTULO	RESUMEN	IMPORTE	%
02	Presupuesto reparación de pilares .....	185.329,40	100,00
	<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL</b>	<b>185.329,40</b>	
	16,00 % Gastos generales .....	29.652,70	
	6,00 % Beneficio industrial.....	11.119,76	
	Suma .....	40.772,46	
	<b>PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN SIN igic</b>	<b>226.101,86</b>	
	6.5% igic.....	14.696,62	
	<b>PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN</b>	<b>240.798,48</b>	

Asciende el presupuesto a la expresada cantidad de DOSCIENTOS CUARENTA MIL SETECIENTOS NOVENTA Y OCHO EUROS con CUARENTA Y OCHO CÉNTIMOS

**Figura 3.10**\_PEM para la adecuación de la estructura estudiada





## CAPÍTULO 4

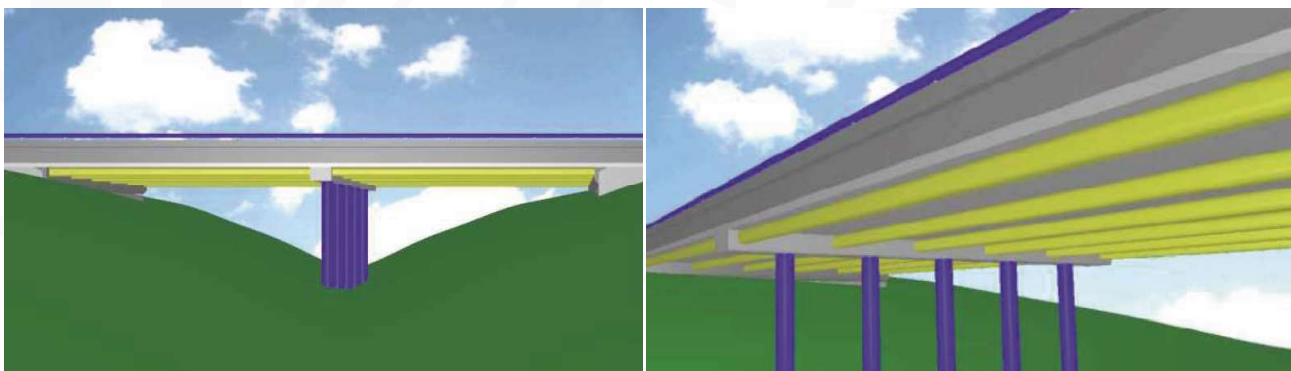
# Casos ejemplos de construcciones conformadas en hormigón armado con elementos de CFRP

Se van a proponer y analizar varios ejemplos de construcciones mediante elementos de CFRP, la gran mayoría de usos han sido siempre en construcción civil, como son los puentes. Nos sirve como buenos ejemplos, ya que estos están sometidos a tipos de exposiciones parecidos a los costeros.

A parte de esto ejemplos civiles, se va a proponer la primera vivienda fabricada en su gran mayoría con hormigón reforzado con CFRP, como lo es "the CUBE" en Dresden.

### 4.1\_Kings Stormwater Channel Bridge.

Kings Stormwater Chennel Bridge es un puente situado en el estado de California, en la ruta 86. Se utilizan soluciones con capas de hormigón reforzado con CFRP. El puente está conformado por dos tramos de 10 metros cada uno, siendo un puente del tipo viga y losa con cinco pilares intermedios. Está compuesto de tubos de fibra de carbono rellenos de hormigón que cruzan longitudinalmente los tramos del puente.



**Figura 4.1** \_ Diferentes vistas del Kings Stormwater Channel Bridge.

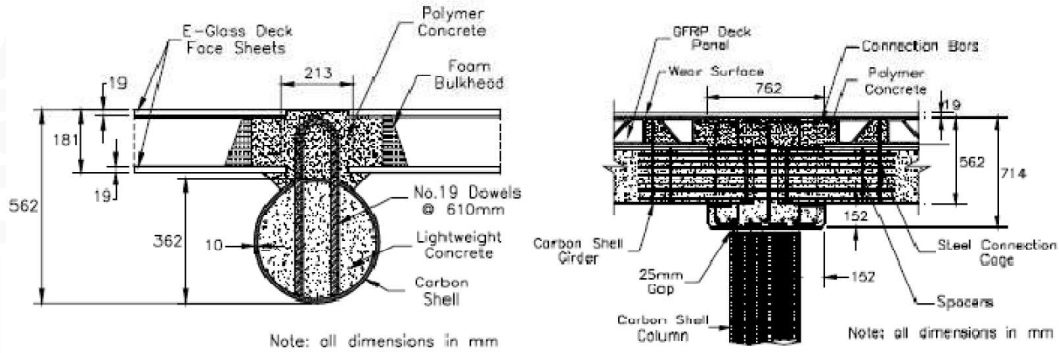
La sección transversal está determinada principalmente por las limitaciones y requisitos estructurales. La profundidad de la estructura era aproximadamente de 762 mm, restringiendo la sección de las vigas. La selección de materiales se basó en requerimientos estructurales operativos y de rendimiento.



**Figura 4.2** \_ Imágenes de la construcción del Kings Stormwater Channel Bridge.

Las vigas longitudinales están formadas por carcassas exteriores de carbono/epoxi enrolladas a hormigón ligero. La losa está formada por hormigón reforzado con fibras de polímeros (FRP).



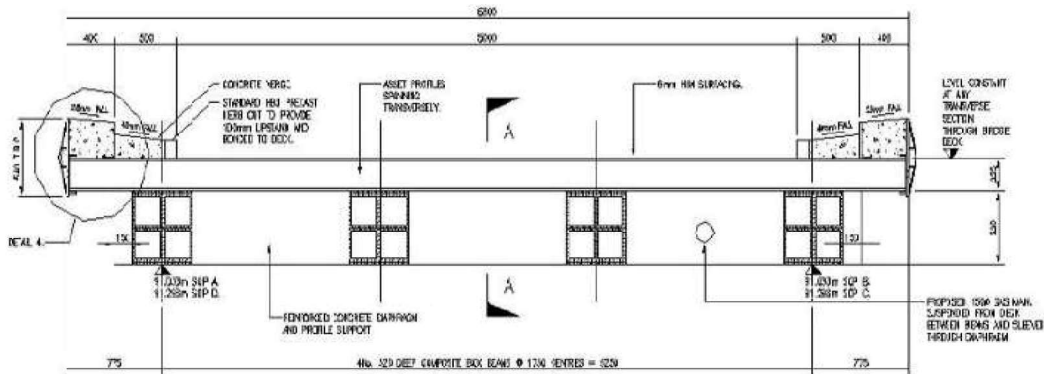


**Figura 4.6** Conexión viga-tablero y viga-pilar.

#### 4.2\_West Mille Bridge

El West Mille Bridge salva el río Cole, en Oxfordshire. Fue inaugurado el 29 de octubre de 2022, siendo el primer puente de carretera pública en Europa occidental construido con compuestos avanzados.

Se utilizaron perfiles de fibras plásticas para las vigas portantes, los paneles laterales y la propia plataforma del puente. Estos perfiles tienen la misma capacidad de carga que los puentes de similares características conformados en acero y hormigón.



**Figura 4.7** Sección transversal del West Mille Bridge.

El puente consta de cuatro vigas portantes. Cada uno de estos cuatro apoyos principales, están conformados por GFRP y CFRP pegados juntos.

El sistema de plataformas consta de 34 perfiles del tipo ASSET unidos entre sí. La barrera contra impactos está hecha de acero. La superficie de desgaste está hecha en hormigón reforzado con CFRP.

El puente requiere un mantenimiento mínimo, ya que los materiales avanzados de los que está fabricado el puente, tienen una vida útil muy larga, considerablemente más que la del hormigón armado en acero, ya que el tablero por ejemplo de hormigón armado con CFRP es resistente al agua y sal, sin necesidad de aplicar capas impermeables.



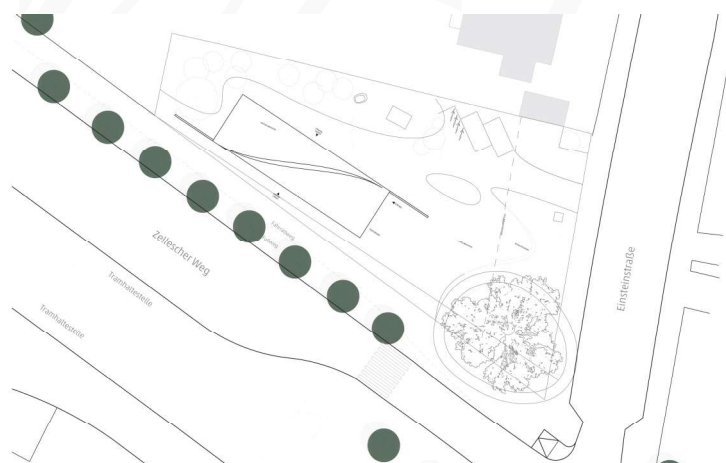
**Figura 4.8** Imágenes infográficas del West Mille Bridge.



**Figura 4.9** \_Imágenes del West Mille Bridge.

### 4.3\_The CUBE.

The CUBE es la primera vivienda construido en hormigón armado con CFRP, iniciada su construcción a finales de Julio del 2020, situado en Fritz-Förster-Platz en Dresde. La edificación tiene una superficie de 220 m<sup>2</sup>, es una construcción experimental y sirve como banco de pruebas. Servirá para analizar la longevidad a largo plazo del hormigón armado con CFRP de una construcción, estructura y mantenimiento visual del material. También se evaluarán los costes de funcionamiento y del ciclo de vida.



**Figura 4.10** \_Emplazamiento de "The CUBE"

La vivienda se compone de dos partes: un "twist" y una caja. Los elementos "twist" son dos carcacas dispuestas simétricamente uno frente al otro, que se retuercen, formando el cerramiento lateral y superior del espacio. La caja es la parte principal de la edificación y brinda la oportunidad de intercambio y monitorización a largo plazo de los elementos estructurales como lo son los paneles de fachada, elementos de cerramiento y elementos multifuncionales de hormigón armado con CFRP, tanto en exteriores como en interiores, para poder probar esta tecnología en construcciones de viviendas.

Con el proyecto CUBE, la intención es que este sistema constructivo de hormigón armado con CFRP sea presentado al público más cercano a este tipo de construcciones debiendo tener un efecto simbólico y de cambio.

Pretende presentar las numerosas ventajas que supone esta combinación de materiales avanzados y potenciales de este tipo de hormigón como lo son:

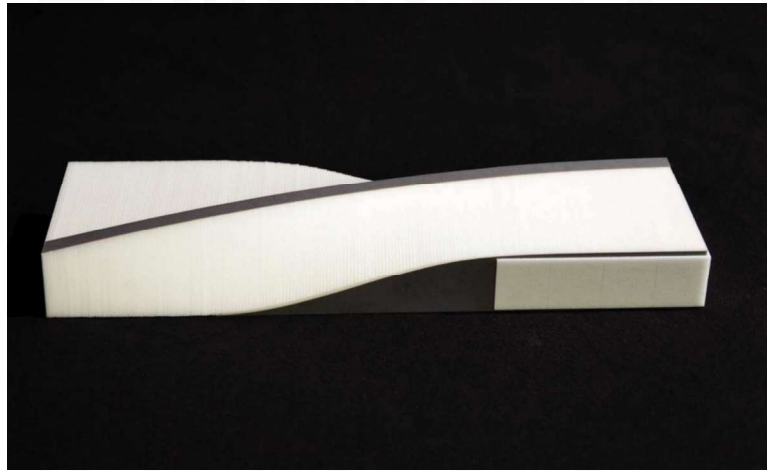
\_Alta eficiencia.

\_Ligero, ya que los elementos estructurales son delgados y fáciles de conformar.

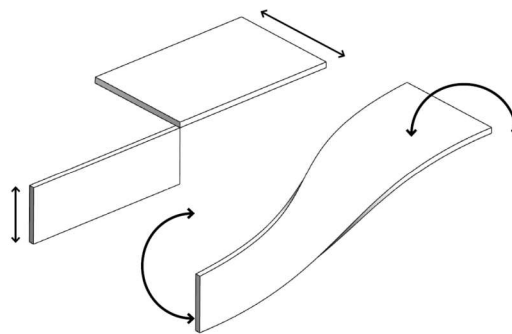


- \_ Larga durabilidad gracias a superficies duraderas y de alta calidad.
- \_ Potencial multifuncionalidad.
- \_ Sostenibilidad a través del ahorro de recursos.

El edificio está destinado a mostrar como se pueden resolver las diferentes tareas de construcción mediante hormigón armado con CFRP y demostrar la idoneidad de este método de construcción para la implementación masiva.



**Figura 4.11** \_Maqueta proyecto "the CUBE".



**Figura 4.12** \_Idea de la cubierta "the CUBE".

Los espacios abiertos tanto en interiores como en exteriores se utilizarán para exposiciones, zonas de exposiciones de arte y otro tipo de eventos, para que no solo el personal científico pueda experimentar, solo también el público en general pueda sentir la experiencia.



**Figura 4.13** \_Proyecto "the CUBE".



## CAPÍTULO 5

# Conclusiones principales

Tras experiencia e investigación sobre materiales avanzados compuestos como lo son los armados de CFRP, sobre todo en el ámbito de la ingeniería, se ha desarrollado y abierto un campo de soluciones para los graves problemas de la corrosión de la edificación y en gran medida en zonas costeras.

La aplicación de esta nuevas técnica de construcción mediante CFRP, ofrece un gran rendimiento en las zonas con las clases de exposición estudiadas, debiendo de implementarse en un futuro cercano, sobre todo, como sustituto del acero pudiendo destacar como conclusión los siguientes puntos:

\_La ligereza de los armados de CFRP, con una densidad de 1,6 g/cm<sup>3</sup>, permite montajes rápidos, estructuras más ligeras y ahorros económicos por la no utilización de maquinaria pesada.

\_La gran resistencia a corrosión, resistencia a la fatiga, transparencia electromagnética y capacidad para resistir en entornos hostiles, lo convierte a las barras de CFRP para uso en armados en hormigones estructurales, en el material ideal como sustituto a los armados en acero, evitando todos los problemas que se han descrito sobre los armados de acero en zonas costeras.

\_Hormigones armados con barras de CFRP son una nueva herramienta para Arquitectos gracias a su estabilidad dimensional, apariencia estética y disminución de volumen estructural, para ganar flexibilidad en el diseño.

\_Se ha podido comprobar la gran reducción de coste económico de utilizar como sustituto a las barras de acero para armados, para toda la vida útil de las barras de CFRP .

\_La alta durabilidad de las barras de CFRP como sustituto del acero, es muy beneficioso para el tema medioambiental, ya que desde el minuto 0 de su fabricación, hasta el final de su vida, hay un ahorro considerable en cuanto a recursos naturales y emisiones.

\_En el aspecto social, los bajos tiempos pueden suponer menos accidentes en obras, menos afectaciones a las personas del entorno de la obra, por ejemplo, por un menor tiempo de cierre de carreteras, y por su mínimo mantenimiento, los ocupantes ganarán en calidad de vida y disminución de costes.

\_Aunque todavía se está investigando en la construcción para viviendas con barras de CFRP, se está verificando el ahorro de costes y durabilidad del servicio, no faltando mucho tiempo para una estandarización de su uso.

Los hormigones armados en acero son un material que fue revolucionario, cambió totalmente la manera de pensar en el proyecto arquitectónico por la versatilidad que ofrecía a los diseñadores, de eso no hay duda. Se ha mejorado la calidad de estos dos componentes pero, se lleva utilizando el mismo sistema desde hace 40 años. La tecnología evoluciona a gran velocidad y con ella, los nuevos materiales, formas de fabricar y construir, y aunque en el sector de la construcción estos cambios cuestan mucho de implementar, los componentes que constituyen la mayor parte de las estructuras en edificación del mundo, deben evolucionar.

En este trabajo se ha planteado uno de los muchos materiales o técnicas que se pueden utilizar para sustituir al acero, las barras de polímeros reforzados con fibra de carbono.



## BIBLIOGRAFÍA

1. "Acero material estructural", 2015. De Blogspot: <http://aceromaterialestructural.blogspot.com/2015/03/efectos-de-la-temperatura-en-el-acero.html>
2. "Fibra de vidrio". De: <http://www.cursos.maximatec.com/downloads/Fibra%20de%20Vidrio.pdf>
3. "Hormigones". Ingeniería de edificación. De: <http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/materiales-ii/contenidos/HORMIGON%20IE.pdf>
4. "Los materiales compuestos y sus aplicaciones en el refuerzo a cortante de estructuras". De : <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6151/06CAPITOL3.pdf?sequence=6&isAllowed=y>
5. "Proyecto de urbanización de vial y puente del ámbito a-8-7.7". Pliego de prescripciones técnicas particulares, capítulo II, artículo 202.
  - A. Gil, 2012. "Resinas de poliéster, guía de manejo". EAFIT.
6. I. Almerich Chulia, 2010. "Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP". Universidad Politécnica de Valencia.
7. Machida, 1993. "State-of-the-art report on continuous fiber reinforcing materials". Concrete Engineering Series 3. Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials.
8. Nanni, E. Bakis, E. Boothby, 1995. "Test Methods for FRP-Concrete Systems Subjected to Mechanical Loads: State of the Art Review". Journal of Reinforced Plastics and Composites.
9. Paz Carvajal, L. M. Ríos Gamboa, G. F. Casanova García, A. Leyton, J. J. García Álvarez, 2017. "Fabricación y caracterización mecánica de un laminado de fibra de carbono en matriz de resina epoxi". Universidad del Valle, Cali, Colombia.
10. ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (2008)
11. Parkyn, 1985. "Glass reinforced plastics". Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, 2nd Ed.
12. Segura Plaza, 2016. "Resistencia estructural: madera, hormigón y acero". De: <https://www.made-rea.es/resistencia-estructural-madera-hormigon-acero/>
13. Basf-Constructions (2011) Recomendaciones para el diseño de planes de control de calidad en ejecución de refuerzos con fibra de carbono. Basf Construction, Barcelona.
14. Basf-Constructions (2012) Norma europea EN 1504. Guía simplificada ilustrada para todos los profesionales del sector de la reparación de hormigón. Basf Construction, Barcelona.
15. Bigaj A. J., den Uijl J. A., Walraven J. C., 1998. "Bond of Ribbed Bars Modelled through Concrete Confinement". Bond and Development of Reinforcement - A Tribute to Dr. Peter Gergely, ACI SP-180, Farmington Hill, pp. 195-213.
16. Bjørntvedt, H; 2013. "New materials in structural design".
17. Blog "Tecnología de los plásticos", 2011. "Poliéter éter cetona (PEEK)" de: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliet-eter-cetona-peek.html>
18. E. da Costa, F. Velasco López, J. M. Torralba Castelló. "Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones". Revista metalurgia.

## BIBLIOGRAFÍA

19. Cairns J., Du Y., Law D., 2006. "Residual bond strength of corroded plain round bars", Magazine of Concrete Research, V. 58, nº 4, pp. 221–231.
20. 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.
21. Clark, A.P., 1946. "Comparative Bond Efficiency of Deformed Concrete Reinforcing Bars", ACI Journal Proceedings V.43, nº 4, pp 381-400.
22. Diederichs U., Schneider U., 1981. "Bond strength at high temperatures", Magazine of Concrete Research, V. 33, nº 115, pp. 75–84.
23. Cosenza, G. Manfredi, R. Realfonzo, 1997. "Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete". Jour. Compo. Constr. Vol. 1.
24. Cosenza, G. Manfredi, R. Realfonzo, 1997. "Behaviour and modelinf od bond of FRP rebars to concrete". Journal Composites Construction.
25. A. Herrera Castañeda. "Ciencia de los polímeros".
26. F. Cos-Gayón López, 2017. "Influencia de elevadas temperaturas en la adherencia de barras de fibra de carbono con el hormigón". Universidad Politécnica de Valencia.
27. Fernández García. S; 2016. "Corrosión de armaduras en el hormigón armado en ambiente marino aéreo".
28. Fib bulletin 40, 2017. "FBR Reinforcement in RC Structures". Technical Report.
29. FIB, 2000. "Bond of reinforcement in concrete, State-of-art Report, Bulletin 10". Fib-International Federation for Concrete Task Group Bond Models.
30. Marshall, 1949. "End anchorage and bond stress in prestressed concrete". Magazine of Concrete Research.
31. G. Morales Antigüedad, 2008. "Procesado y caracterización de materiales compuestos de matriz polimétrica reforzados con nanofibras de carbono para aplicaciones tecnológicas". Universidad Complutense de Madrid.
32. González, V; Barrios Padura, A; Molina Huelva, M; Proyectos de rehabilitación estructural. La sostenibilidad de los refuerzos con materiales compuestos.
33. Blontrock, L. Taerwe, S. Matthys, 1999. "Properties of fibre reinforced plastics at elevated temperatures with regard to fire resistance of reinforced concrete members". Proceedings 4th International Symposium on Non-Metalic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.
34. H. Sarrión Sos, 2018. "Propiedades y aplicaciones de los polímeros sintéticos en la construcción". Universidad Politécnica de Valencia.
35. H. V. S. GangaRao, N. Taly, P. V. Vijay, 2006. "Reinforced concrete design with FRP composites". CRC Press, Taylor & Francis Group.
36. Howarth J, Mareddy S, Mativenga, PT (2014) Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite. Journal of Cleaner Production 81: 46-50

## BIBLIOGRAFÍA

37. Montava Belda. "Estudio del comportamiento de estructuras de hormigón armado con perfiles metálicos completamente embebidos". Universidad de Alicante. Escuela politécnica superior.
38. Institut de promoció cerámica. "El cemento y sus tipos". De: [http://www.ipc.org.es/dms/pdfs/Morteros\\_tradicionales/El\\_cemento\\_y\\_sus\\_tipos/4-6-4- C\\_PDF.pdf](http://www.ipc.org.es/dms/pdfs/Morteros_tradicionales/El_cemento_y_sus_tipos/4-6-4- C_PDF.pdf)
39. Instituto Valenciano de la Edificación IVE (2008) Experiencia en Inspección de estructuras en edificios. Comunidad Valenciana 1991-2008. Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, Valencia.
40. Instituto Valenciano de la Edificación IVE (2008) Guía para la Inspección y Evaluación Preliminar de estructuras de hormigón en edificios existentes. Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, Valencia.
41. M. Escacena Ventura. "Caracterización de las propiedades mecánicas del aluminio 7075-T651".
42. J. M. García Polo, 2013. "Estructuras de hormigón pretensado armadas con FRP (Fibers Reinforcement Polymers)". Universidad Politécnica de Valencia.
43. J. Poveda Bernal, 2012. "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte". Universidad de Valladolid.
44. J. R. Martí Vargas, 2002. "Estudio experimental de la adherencia de cordones pretesos en hormigón de altas prestaciones iniciales". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
45. J. Torres Vegara, 2018. "Estudio comparativo de barras corrugadas de diferentes materiales para armar hormigón". Universidad Politécnica de Valencia.
46. Jiang L et al (2015) Recycling carbon fiber composites using microwave irradiation: Reinforcement study of the recycled fiber in new composites. J. Appl. Polym. Sci 132(41)
47. Keith MJ, Oliveux G, Leeke GA (2016) Optimisation of solvolysis for recycling carbon fibre reinforced composites. Paper presented at the 17th European Conference on Composite Materials, University of Munich, Germany, 26-30 June 2016.
48. A. Caro Forero, 2012. "Comportamiento adherente diferido de armaduras pretensadas en hormigón". Universidad Politécnica de Valencia
49. C. Bank, T. R. Gentry, 1995. "Accelerated Test Methods to Determine the Long-Term Behaviour of FRP Composite Structures". Environmental Effects, Journal of Reinforced Plastic and Composites. Vol. 14.
50. L. Colin, 1956. "Composites for construction: structural design with FRP materials". Wiley, John Wiley & Sons, INC.
51. Lago C et al (2007) Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el Transporte. CIEMAT, Madrid
52. López Molina. J; 2012. "Refuerzo a flexión de vigas de hormigón mediante polímeros reforzados con fibra de carbono".
53. Baena, L. Torres, A. Turon, C. Barris, 2009. "Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test". Composites.

## BIBLIOGRAFÍA

54. M. Gonzalez Villarreal, 2014. "Optimización de las propiedades mecánicas de compuestos de resina poliéster reforzados con fibras de vidrio y cargas de carbonato de calcio". Universidad Autónoma de Nuevo León.
55. M. Meseguer Morán, G. Gili, 2000. "Hormigón armado". Ingeniería rural. Barcelona.
56. Maña i Reixach F, Bellmunt et al. (2005) Recomendaciones para el reconocimiento sistemático y la diagnosis rápida de forjados construidos con cemento aluminoso. ITC, Barcelona
57. Muñoz Marzá, Carlos; Vilar, Maite; Garraín Cordero, Daniel. Evolución del impacto medioambiental de los retrovisores de vehículos. Evaluación mediante análisis del ciclo de
58. Náutica, 2015. "El hormigón". Clase construcción y estructura. De: [https://wiki.ead.pucv.cl/images/5/5a/Clase\\_2\\_construcci%C3%B3n\\_1\\_n%C3%A1utica\\_2\\_015\\_Hormig%C3%B3n.pdf](https://wiki.ead.pucv.cl/images/5/5a/Clase_2_construcci%C3%B3n_1_n%C3%A1utica_2_015_Hormig%C3%B3n.pdf)
59. Osorio Cardona JF (2011) El consumo sostenible de los materiales usados en la construcción de vivienda: la perspectiva sistémica. Dissertation, Universidad Nacional de Colombia
60. B. Shing, D. E. Cooke, D. M. Frangopol, M. A. Leonard, M. L. McMullen, W. Hutter, 2000. "Stand development and transfer length tests on high performance concrete box girders".
61. Valles Pla, 2013. "Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación". Universidad Politécnica de Valencia.
62. Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".
63. Pereira, JJMG (2015) Bases de trabalho para a avaliação do ciclo de vida de vigas em betão armado reforçadas com laminados de CFRP de acordo com as técnicas EBR e NSM.
64. E. Allred, 1984. "The effects of temperature and moisture content on the flexural response of Kevlar/epoxy laminates". Environmental Effects on Composites Materials.
65. M. G. K. Rao, N. Balasubramanian, M. Chanda, 1981. "Factors affecting moisture absorption in polymer composites". Influence of External Factors, Environment Effects on Composite Materials.
66. Revista ARQHYS. 2012, 12. Acero y construcción. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com. Obtenido 08, 2019, de <https://www.arqhys.com/arquitectura/acero-construccion.html>.
67. Revista ARQHYS. 2012, 12. Propiedades del acero. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com. Obtenido 08, 2019, de <https://www.arqhys.com/arquitectura/acero-propiedades.html>.
68. Revista ARQHYS. 2017, 11. Características del acero. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com. Obtenido 08, 2019, de <https://www.arqhys.com/construccion/acero-caracteristicas.html>.
69. Río Bueno A (2008) Patología, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado de edificación. UPM, Madrid.
70. Rivarola A, Torres L, Rivarola AM, Berrios G, Gardey MC, Gatica P. (2011) Estudio y comparación de alternativas de fin de vida aplicadas a palas de aerogeneradores, empleando metodología de análisis de ciclo de vida.



## BIBLIOGRAFÍA

71. Serrano Lanzarote B (2014) IEE.CV Informe de Evaluación del Edificio, Comunitat Valenciana, Guía de Inspección. Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, Valencia
72. Sika (2007) Procedimiento de aplicación. Sistemas de refuerzos de estructuras. Sika AG, Madrid
73. Song Young S, Youn Jae R, Gutowski, TG (2009) Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40(8): 1257-1265
74. E. Cousins, J. M. Stallings, M. B. Simmons, 1994. "Reduced Strand Spacing in Pretensiones, Prestressed Members". *ACI Structural Journal*.
75. Tjibaou C, Piano R. Sostenibilidad en la edificación. Centro Cultural Jean Marie Tjibaou.
76. UNE EN 1504 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón (2006)
77. Universidad Tecnológica Nacional, "Determinación de la tensión Adm. de una barra de acero por medio del diagrama". Facultad Regional Rosario. Departamento de ingeniería civil. Tecnología de los materiales.
78. Van der Veen, C., 1992. "Cryogenic bond behaviour and tension stiffening", Bond in Concrete. International Conference Bond in Concrete - From Research to Practice. Proceedings. CEB and Riga Technical University, Riga Latvia, 15-17, pp 10.1-10.10.
79. vida. 2008.
80. Vilches Such, A; Lizana-Moral, FJ; Barrios-Padura, A; Díaz-heredia, I; Serrano-Jiménez, AJ. (2014). Responsible management of construction resources. Amortization of the concrete's embodied environmental impact as a sustainable strategy. World Sustainable Building Conference 2014. Barcelona, Spain.
81. Y. Kato, T. Nishimura, T. Uomoto, T. Yamaguchi, 1998. "The effect of ultraviolet rays to FRP rods". Proc. CDCC '98.
82. Y. Wang, P. Womg, V. Kodur, 2007. "An experimental study of the mechanical properties of fibre reinforced polymer (FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures". *Composite Structures*, vol. 80.
83. Z. Achillides, K. Pilakoutas, 2004. "Bond behaviour of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions". *ASCE J. Composer. Constr.*



## BIBLIOGRAFÍA DE TABLAS

**Tabla 1.1** \_“Proyecto de urbanización de vial y puente del ámbito a-8-7.7”. Pliego de prescripciones técnicas particulares, capítulo II, artículo 202.

**Tabla 1.2** \_C. Rondon, 2005. “Manual de Armaduras de Refuerzo para Hormigón Fabricación - Instalación – Protección”. Gerdau aza.

**Tabla 1.3** \_Ginesta Hervás, C; 2019. “Análisis de estructuras de edificios realizadas con distintos tipos de armados”.

**Tabla 1.4** \_Mariano, 2011. “Poliéter éter cetona (PEEK)”. Blog tecnología de los plásticos.

**Tabla 1.5** \_Adaptación de J. C. Leguísamo Milla, 2018. “Caracterización de un material compuesto de fibra de coco y matriz de resina epoxi”.

**Tabla 1.6** \_Adaptación de M. Gonzalez Villarreal, 2014. “Optimización de las propiedades mecánicas de composites de resina poliéster reforzados con fibras de vidrio y cargas de carbonato de calcio”. Universidad Autónoma de Nuevo León.

**Tabla 1.7** \_Adaptación de JSCE 1997(b).

**Tabla 1.8** \_Adaptado de ACI 440.1R-06.

**Tabla 2.1** \_Adaptado de FIB, 2007.

**Tabla 2.2** \_Adaptado de FIB, 2007.

**Tabla 2.3** \_Adaptado de ACI 440.1R-06.

**Tabla 2.4** \_Adaptado de Davalos et al. 2005, tabla 5

**Tabla 2.5** \_Adaptado de Davalos et al., 2005, Tabla 6.

**Tabla 2.6** \_Adaptado de FIB 2007, Tabla 3.1.

**Tabla 2.7** \_Adaptado de Wang et al., 2007.

**Tabla 2.8** \_Adaptación de V. Calvet Rodríguez, 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.

**Tabla 2.9** \_Adaptación de V. Calvet Rodríguez, 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.

**Tabla 2.10** \_Ginesta Hervás, C; 2019. “Análisis de estructuras de edificios realizadas con distintos tipos de armados”.

**Tabla 2.11** \_Adaptado de V. González et al., 2017.

## BIBLIOGRAFÍA DE TABLAS

**Tabla 2.12** \_Adaptado de *Song et al., 2009*.

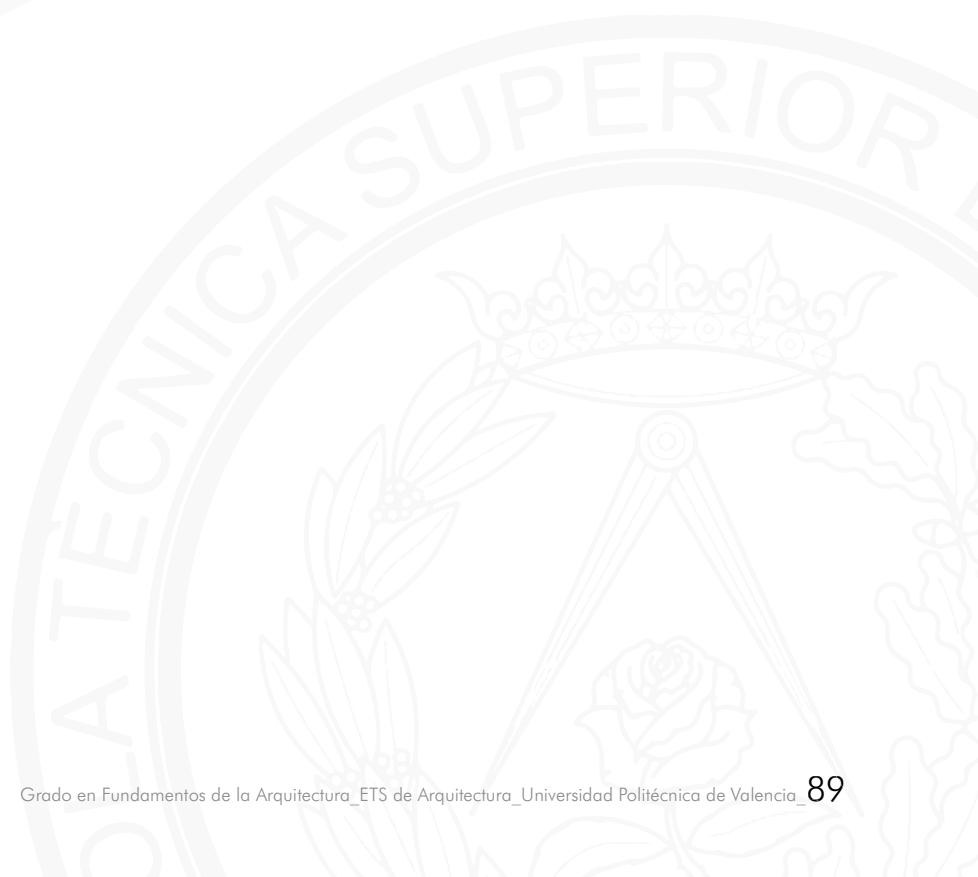
**Tabla 2.13** \_Adaptado de *V. González et al., 2017*.

**Tabla 3.1** \_Material propio.

**Tabla 3.2** \_Material propio.

**Tabla 3.3** \_Material propio.

**Tabla 3.4** \_Material propio.





## BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS

**Figura 1.1** \_ “Aditivos para concreto”. Ingeniero de caminos.

**Figura 1.2** \_ “Hormigones”. Ingeniería de edificación.

**Figura 1.3** \_ G. Camayo Guzman, 2016. “Principios fundamentales del hormigón armado”. Del blog SlideShare.

**Figura 1.4** \_ “Barras corrugadas S y SD”. Calidad siderúrgica.

**Figura 1.5** \_ F. Sánchez Banda, 2017. “Conoce los materiales compuestos y multifuncionales”. Cien-ciamx.

**Figura 1.6** \_ F. A. Herrera Castañeda. “Ciencia de los polímeros”.

**Figura 1.7** \_ Mariano, 2011. “Resina epoxi”. Blog tecnología de los plásticos.

**Figura 1.8** \_ M. Gonzalez Villarreal, 2014. “Optimización de las propiedades mecánicas de composites de resina poliéster reforzados con fibras de vidrio y cargas de carbonato de calcio”. Universidad Autónoma de Nuevo León.

**Figura 1.9** \_ “Fibras sintéticas y especiales”, 2013. Blog Blogspot.

**Figura 1.10** \_ Proceso de pultrusión. Adaptado de Strongwell

**Figura 1.11** \_ Variedad de geometrías de barras de CFRP. *Katz et al., 1999, 2000; Bank, 2006; Esfandeh et al., 2009; Wang et al., 2006.*

**Figura 1.12** \_ Variedad de geometrías superficiales de barras de CFRP. *Katz et al., 1999, 2000; 2006; Esfandeh et al., 2009; Wang et al., 2006.*

**Figura 1.13** \_ Identificación de las barras de CFRP. Adaptado de *CNR-DT 203/2006 (Apéndice C).*

**Figura 2.1** \_ Ejes de las barras de CFRP. Adaptado de *FIB, 2007.*

**Figura 2.2** \_ Comportamiento de las fibras de carbono tensión/deformación, de la matriz polimétrica y de la barra de CFRP. Adaptado de *ISIS, 2000.*

**Figura 2.3** \_ Comportamiento de las barras de CFRP tensión/deformación y acero. Adaptado de *Gdoutos et la., 2000.*

**Figura 2.4** \_ Distribución de las tensiones normales en la sección transversal de una barra de CFRP. Adaptado de *Achillides et la., 2004.*

**Figura 2.5** \_ Influencia del ángulo de la tensión aplicada en la rigidez de las barras de CFRP. Adaptado de *Peters, 1998.*

**Figura 2.6** \_ Modos de rotura de las barras de CFRP en función del ángulo de la tensión aplicada. Adaptado de *Peters., 1998.*

## BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS

**Figura 2.7** \_Influencia del porcentaje del volumen total de las barras de CFRP de fibra de carbono en su resistencia. Adaptado de *Yuan et al., 2001*.

**Figura 2.8** \_Tensión de corte transversal ( $\tau_3$ ) aplicada a una barra de CFRP. Adaptado de *FIB, 2007*.

**Figura 2.9** \_Ensayos de resistencia a tracción sometidas a diferentes temperaturas en barras de CFRP. *Wang et al., 2008*.

**Figura 2.10** \_Comportamiento mecánico de la exposición a diferentes temperaturas de las barras de CFRP, GFRP y acero. *Wang et al., 2007*.

**Figura 2.11** \_Comparación de comportamientos mecánicos a) R. Tracción, b) Módulo elástico frente a diferentes temperaturas en barras de CFRP, GFRP y acero. *Y. C. Wang et al., 2007*.

**Figura 2.12** \_M. C. Delgado Bueno, 2008. "Modelización numérica del comportamiento adherente acero-hormigón en presencia de compresión transversal".

**Figura 2.13** \_V. Calvet Rodríguez, 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 2.14** \_"Armaduras-Hormigón: Características de adherencia", 2012. Blog constructor civil.

**Figura 2.15** \_V. Calvet Rodríguez, 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 2.16** \_V. Calvet Rodríguez, 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 2.17** \_V. Calvet Rodríguez, 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 2.18** \_V. Calvet Rodríguez, 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 2.19** \_V. Calvet Rodríguez, 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 3.1** \_Material propio.

**Figura 3.2** \_Material propio.

**Figura 3.3** \_Material propio.



## BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS

**Figura 3.4**\_Material propio.

**Figura 3.5**\_Material propio.

**Figura 3.6**\_Material propio.

**Figura 3.7**\_Material propio.

**Figura 3.8**\_Material propio.

**Figura 3.9**\_Material propio.

**Figura 3.10**\_Material propio.

**Figura 4.1**\_Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".

**Figura 4.2**\_Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".

**Figura 4.3**\_Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".

**Figura 4.4**\_Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".

**Figura 4.5**\_Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".

**Figura 4.6**\_Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".

**Figura 4.7**\_Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".

**Figura 4.8**\_Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".

**Figura 4.9**\_Pawel Bernard, P; 2011. "Use of fibre reinforced polymer composites in bridge construction. State of the art in hybrid and all-composite structures".

**Figura 4.10**\_BFT Magazine, ISSUE 06/2020.

**Figura 4.11**\_BFT Magazine, ISSUE 06/2020.

**Figura 4.12**\_BFT Magazine, ISSUE 06/2020.

**Figura 4.13**\_BFT Magazine, ISSUE 06/2020.

**Figura 4.11**\_BFT Magazine, ISSUE 06/2020.

## BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS

**Figura 4.12**\_BFT Magazine, ISSUE 06/2020.

**Figura 4.13**\_BFT Magazine, ISSUE 06/2020.