



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA



TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA
CURSO 2019/2020

**ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE EDIFICIOS
REALIZADAS CON DISTINTOS TIPOS DE
ARMADOS**

AUTORA:
CARMINA GINESTA HERVÁS

TUTOR:
VÍCTOR CALVET RODRÍGUEZ

RESUMEN

En los últimos años, debido al gran problema que presenta el acero frente a la corrosión en las estructuras de hormigón armado, se ha acentuado la necesidad del empleo de otros materiales como armado de estas estructuras, pero estos materiales deben garantizar que pueden cumplir todo aquello que estas estructuras requieren durante la vida útil del edificio.

El presente estudio se basa en el armado de las estructuras de hormigón armado, siendo las barras corrugadas de acero las más empleado para realizar esta función, pero en los últimos años se han descubierto otros materiales capaces de sustituir al acero en este tipo de estructuras, tales como las barras reforzadas con fibra de carbono, fibra de vidrio o fibra de basalto. Cada uno de estos materiales presenta distintas propiedades, las cuales se comparan en el presente estudio con el objetivo de analizar cuál de ellos es el material más adecuado según el tipo de edificación.

Estos tres tipos de barras se comparan tanto entre ellos, como con el acero, con el fin de demostrar, por una parte, que son capaces de aportar a la estructura todo aquello que aportaba el acero, y, por otra parte, cuál de ellas es la más apropiada con respecto a las propiedades, durabilidad, adherencia y precio.

Tras el análisis de los resultados obtenidos en este estudio, se muestra que las barras reforzadas con fibra de basalto son una opción óptima en edificaciones sin grandes cargas y en zonas con ambientes salinos, ya que puede llegar a soportar tensiones mucho mayores que las del acero, con la ventaja adicional de que es un material anticorrosivo, por lo que elimina la necesidad de reparaciones futuras y garantiza una mayor durabilidad; y que las barras reforzadas con fibra de carbono son una buena opción cuando se trata de edificaciones que tienen que soportar cargas muy elevadas, ya que su resistencia a tracción es mucho mayor que las barras reforzadas con fibra de basalto, pero no comparten su comportamiento frente a ambientes salinos, aunque sigue teniendo una mejor respuesta frente a la corrosión que el acero. Por todo ello, estos materiales podrían sustituir al acero en las estructuras de hormigón armado e incluso mejorar su comportamiento.

PALABRAS CLAVE

Hormigón, barras de acero, barras de fibra de carbono, barras de fibra de vidrio, barras de fibra de basalto, CFRP, GFRP, BFRP, matriz polimérica, FRP, barras reforzadas con fibras.

ABSTRACT

Over the last years, due to the great problem that the steel has because of the corrosion in reinforced concrete structures, the need for the use of other materials as reinforcement for these structures has been accentuated, but these materials must be able to fulfil everything that these structures require during the useful life of the building.

The present study is based on the reinforcement of reinforced concrete structures, being the corrugated steel bars the most used to perform this function, but in recent years other materials capable of replacing steel in these types of structures have been discovered, such as bars reinforced with carbon fibre, fiberglass or basalt fibre. Each one of these materials has different properties, which are compared in the present research in order to demonstrate which of them is the most suitable material according to the kind of building.

These three types of bars are compared to each other, as well as to the steel, in order to demonstrate, on the one hand, that they are capable of giving to the structure all that the steel gave to it, and, on the other hand, which of them is the most appropriate in respect of properties, durability, adhesion and price.

After the analysis of the results obtained in this investigation, it is demonstrated that the bars reinforced with basalt fibre are an optimal option in buildings without high loads and in areas with saline environments, as they can endure stresses much bigger than the steel, with the additional advantage that it is an anticorrosive material, so it eliminates the need of futures repairs and guarantees a better durability; and that the bars reinforced with carbon fibre are a good option when it comes to buildings that have to endure very high loads, as their tensile strength is much bigger than the bars reinforced with basalt fibre, but they don't share their behaviour with saline environments, although it still has a better response to corrosion than the steel. Therefore, these materials could replace the steel in reinforced concrete structures and even improve their behaviour.

KEY WORDS

Concrete, steel bars, carbon fibre bars, fiberglass bars, basalt fibre bars, CFRP, GFRP, BFRP, polymer matrix, FRP, fibre reinforced bars.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
ÍNDICE.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	12
METODOLOGÍA.....	12
CAPÍTULO 1. Componentes de la estructura.....	15
1.1 Hormigón.....	15
1.1.1. Áridos.....	15
1.1.2. Cemento.....	15
1.1.3. Agua.....	17
1.1.4. Adiciones.....	17
1.1.5. Aditivos.....	17
1.2 Armado.....	19
1.2.1. Tipos de armado.....	20
1.2.1.1. Acero.....	20
1.2.1.2. Polímeros reforzados con fibras (FRP).....	21
1.2.1.2.1. Matrices poliméricas.....	22
1.2.1.2.1.1. Resinas termoplásticas.....	23
1.2.1.2.1.2. Resinas termoestables.....	25
1.2.1.2.2. Fibras.....	30
1.2.1.2.2.1. Fibra de carbono.....	30
1.2.1.2.2.2. Fibra de vidrio.....	31
1.2.1.2.2.3. Fibra de basalto.....	33

CAPÍTULO 2. Propiedades de los armados.....	35
2.1. Propiedades físicas.....	35
2.1.1. Densidad.....	35
2.1.2. Coeficiente de dilatación térmica	36
2.1.3. Conductividad eléctrica.....	37
2.2. Propiedades mecánicas.....	38
2.2.1. Tracción.....	38
2.2.2. Compresión.....	43
2.2.3. Cortante.....	46
2.3. Durabilidad.....	47
2.3.1. Efecto del agua.....	47
2.3.2. Efecto de los cloruros.....	48
2.3.3. Efecto de los álcalis.....	48
2.3.4. Efecto de la Radiación Ultravioleta (UV).....	50
2.3.5. Efecto de la temperatura.....	50
2.3.6. Efecto de la carbonatación del hormigón.....	53
2.4. Adherencia hormigón-armado.....	53
2.4.1. Factores que influyen en la adherencia.....	53
2.4.2. Adherencia hormigón-acero.....	58
2.4.3. Adherencia hormigón-CFRP.....	58
2.4.4. Adherencia hormigón-GFRP.....	63
2.4.5. Adherencia hormigón-BFRP.....	63
CAPÍTULO 3. Coste de las barras.....	65
3.1 Barras reforzadas con fibra de carbono (CFRP).....	65
3.2 Barras reforzadas con fibra de vidrio (GFRP).....	66
3.3 Barras reforzadas con fibra de basalto (BFRP).....	66
CAPÍTULO 4. Análisis de los resultados.....	69
CAPÍTULO 5. Conclusiones principales.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	81
BIBLIOGRAFÍA TABLAS.....	86
BIBLIOGRAFÍA FIGURA.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Tipos de cementos comunes y sus componentes.....	16
Tabla 1.2. Recubrimiento mínimo de las barras.....	19
Tabla 1.3. Propiedades resinas termoplásticas.....	24
Tabla 1.4. Propiedades mecánicas PEEK.....	24
Tabla 1.5. Propiedades resina epoxi.....	27
Tabla 1.6. Propiedades resina de poliéster.....	28
Tabla 1.7. Propiedades fibra de basalto.....	34
Tabla 2.1. Densidad de las barras de FRP y acero.....	35
Tabla 2.2. Coeficientes de dilatación térmica de las barras con un V_f de 0,5 a 0,75.....	37
Tabla 2.3. Ensayos pérdida de resina por efecto de los álcalis.....	49
Tabla 2.4. Resultado estudio realizado por Y. C. Wang et al. en 2007 sobre la resistencia a tracción de las barras de CFRP sometidas a elevadas temperaturas.....	52
Tabla 2.5. Tensiones adherentes de las barras corrugadas o con tratamiento superficial.....	61
Tabla 2.6. Mecanismo de adherencia de barras corrugadas o tratamiento superficial.....	61
Tabla 3.1. Comparación propiedades CFRP y acero.....	64
Tabla 3.2. Comparación propiedades GFRP y acero.....	65
Tabla 3.3. Comparación propiedades BFRP y acero.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tipos de áridos.....	18
Figura 1.2. Uso de aditivos.....	18
Figura 1.3. Deformación estructura hormigón armado.....	19
Figura 1.4. Identificación barras según corrugas.....	21
Figura 1.5. Estructura barras de polímeros reforzados con fibras.....	21
Figura 1.6. Resina epoxi estructura 3D.....	26
Figura 1.7. Estructura química resina epoxi.....	26
Figura 1.8. Estructura química de resina poliéster.....	28
Figura 1.9. Estructura resina vinil éster.....	29
Figura 1.10. Estructura fibra de carbono.....	31
Figura 1.11. Estructura química fibra de vidrio.....	32
Figura 1.12. Barras reforzadas con fibra de basalto.....	33
Figura 2.1. Direcciones de barras FRP.....	36
Figura 2.2. Comportamiento a tracción del acero.....	38
Figura 2.3. Línea de descarga del acero sometido a esfuerzo de tensión.....	39
Figura 2.4. Comportamiento a tracción de la fibra de carbono, matriz polimérica y barra de CFRP.....	40
Figura 2.5. Distribución de tensiones en sección transversal.....	41
Figura 2.6. Influencia de la dirección de la tensión en relación con la rigidez de la barra.....	41
Figura 2.7. Comportamiento a tracción de las barras de GFRP.....	42
Figura 2.8. Comportamiento a tracción de las barras BFRP.....	43
Figura 2.9. Modo de rotura de las barras de FRP en función de la dirección de la tensión.....	44
Figura 2.10. Porcentaje de volumen de fibra de carbono en relación con la resistencia de las barras.....	45

Figura 2.11. Resistencia a compresión en relación con el diámetro de las barras de GFRP.....	45
Figura 2.12. Barra FRP sometida a una fuerza cortante transversal.....	46
Figura 2.13. Variación de la T_g en relación con la rigidez del polímero en presencia de humedad.....	51
Figura 2.14. Comparación de resistencias a tracción en barras de FRP y de acero a distintas temperaturas.....	52
Figura 2.15. Comparación del módulo elástico en barras de FRP y de acero a distintas temperaturas.....	53
Figura 2.16. Geometría barra corrugada.....	55
Figura 2.17. Tensión adherente en función de la dirección de vertido.....	57
Figura 2.18. Efecto de adherencia entre hormigón y barras de acero.....	58
Figura 2.19. Esquema barras de CFRP según geometría superficial.....	58
Figura 2.20. Gráfica tensión adherente/desplazamiento entre barra lisa de CFRP y hormigón.....	59
Figura 2.21. Gráfica tensión adherente/deslizamiento entre Distintas barras de FRP y hormigón.....	60
Figura 2.22. Gráfica tensión adherente/deslizamiento entre barras corrugadas de CFRP y hormigón.....	60
Figura 2.23. Comportamiento adherente entre barra de CFRP y hormigón.....	62
Figura 4.1. Comparación densidades.....	69
Figura 4.2. Comparación expansión térmica.....	70
Figura 4.3. Comparación resistencia a tracción.....	72
Figura 4.4. Comparación resistencia a compresión.....	72
Figura 4.5. Comparación adherencia con el hormigón.....	73
Figura 4.6. Comparación precios.....	74

INTRODUCCIÓN

El acero es el material que más se emplea en la construcción de estructuras de hormigón armado, pero presenta una serie de problemas, como la corrosión de las armaduras en ambientes salinos, reducción de la resistencia a elevadas temperaturas, gran coste de mantenimiento a largo plazo, menor durabilidad, etc. Se han buscado numerosas soluciones para evitar estos problemas, pero únicamente se ha conseguido ralentizarlos.

A finales de los 70, apareció un nuevo material para el armado de las estructuras de hormigón, los polímeros reforzados con fibras (FRP). Este nuevo material no solo soluciona el problema de la corrosión, ya que son materiales mucho más resistentes a ambientes agresivos, sino que además poseen mejores propiedades resistentes y son mucho más ligeros que el acero.

Estos materiales empezaron a utilizarse como refuerzo de las estructuras de hormigón armadas con acero que presentaban problemas de corrosión, en estructuras situadas en ambientes salinos, en lugares con ciclos de hielo/deshielo, etc. Por lo que finalmente se han empezado a investigar el empleo de las barras de FRP como armado en las estructuras de hormigón, ya que evitarían muchos de los problemas que el acero presenta, y mejorarían las condiciones de la estructura.

Se han realizado numerosos estudios a lo largo de los últimos años con el fin de determinar aproximadamente el comportamiento de estos materiales como armado de hormigón. Existen distintos tipos de fibras que se pueden emplear en las barras de FRP, todas ellas han demostrado poseer muy buenas propiedades mecánicas, físicas, de durabilidad, y de adherencia, pero pocos han sido los estudios que han comparado estas propiedades entre el acero, las barras reforzadas con fibra de carbono, las barras reforzadas con fibra de vidrio y, sobre todo, las barras reforzadas con fibra de basalto. La gran parte de los estudios comparativos entre estos tipos de materiales, los comparan con la fibra de armenio y muy pocos hablan de la fibra de basalto, por ello se ha decidido estudiarla y compararla en este estudio, ya que podría proporcionar grandes beneficios en el ámbito de la edificación por su bajo precio y sus magníficas propiedades y durabilidad.

OBJETIVOS

El objetivo de este estudio se basa en analizar las distintas propiedades y características de diferentes tipos de armados en estructuras de hormigón, centrándose en el estudio de las barras reforzadas con distintos tipos de fibra, y posteriormente compararlas con el acero y entre ellas, con el fin de determinar si sería posible sustituir al acero en su función en estas estructuras, y cuál de ellas sería la más adecuada en función de la relación entre sus propiedades y su precio.

METODOLOGÍA

Para realizar esta investigación, inicialmente se estudian los distintos componentes del hormigón y del armado, investigando primero el comportamiento del acero y posteriormente los componentes y propiedades de las barras de FRP. Se analizan tanto las propiedades físicas como las mecánicas, durabilidad, adherencia y precio de los armados.

Para llegar a las conclusiones, se comparan los aspectos mencionados anteriormente y se escoge un material como el más adecuado como armado de estructuras de hormigón.

CAPÍTULO 1

COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA

En este capítulo se enumeran y analizan aquellos materiales que componen una estructura de hormigón armado. Este estudio tiene como objetivo la comparación de los diferentes armados para la construcción de estructuras de hormigón, por ello este apartado se va a centrar sobre todo en la composición de las barras y sus distintos refuerzos.

1.1. Hormigón

El hormigón es la parte de la estructura que le proporciona la resistencia a compresión. Su resistencia dependerá del grado de compactación que este tenga, el cual dependerá de la ductilidad.

Está compuesto por distintos elementos, y dependiendo de la proporción de estos, el hormigón posee unas características u otras, es decir, es un material que se puede adaptar a las necesidades de cada construcción y del medio que la rodea, por lo que es muy importante la dosificación de sus compuestos. La mezcla de los componentes de los hormigones estructurales se realiza en centrales, donde se vierten los distintos elementos en una amasadora y se dejan mezclar hasta que queda una muestra homogénea.

1.1.1. Áridos

Los áridos son uno de los componentes más importantes del hormigón, son partículas de diferentes tamaños y naturaleza (gravas y arenas) y ocupan más o menos el 80% del volumen del hormigón.

Su adherencia con el cemento viene dada por su porosidad y su absorción, de lo que también depende su resistencia mecánica y su durabilidad. La EHE-08 determina que según las normativas UNE 83.133 y UNE 83.134 los áridos tienen que absorber como máximo un 5% de agua. (Hormigones. Ingeniería de edificación.)

1.1.2. Cemento

Es un conglomerante hidráulico que una vez mezclado con el agua, fragua y endurece tanto si está en contacto con el aire como si no.

El cemento está formado por distintos elementos, como los clínkeres portland (elementos principales del cemento), aditivos para cementos y algunas adiciones como: clínkeres aluminosos, escorias siderúrgicas, puzolanas naturales, cenizas volantes, humo de sílice, filleres calizos, reguladores de fraguado. Los aditivos se utilizan en la fabricación del cemento para ayudar en

dicho proceso o para proporcionar ciertas características al cemento, y como máximo su dosificación puede ser la del 1% en masa.

Las distintas dosificaciones de estos elementos dan lugar a los distintos tipos de cementos. En la siguiente Tabla 1.1 se pueden observar los distintos tipos de cementos comunes.

Tipo de cemento	Denominación	Designación	Clínker K	Escoria de Horno alto 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	— —	— —	— —	— —	0-5 0-5
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 sus componentes.

1.1.3. Agua

El agua es añadida en el momento del amasado y en el momento del curado, y debe de ser un agua con características adecuadas para no contaminar la mezcla ni dañar la estructura, como podría ser el agua potable.

- Amasado: es añadida agua a la mezcla una sola vez para hidratarla y hacer que el hormigón sea moldeable para adaptarse a cualquier tipo de forma. En esta etapa, la cantidad de agua que se vierte tiene que ser la mínima posible, ya que si se añade agua en exceso al evaporarse esta deja huecos en el hormigón que reducen su resistencia física.
- Curado: en esta etapa se añade agua varias veces. Sirve para equilibrar el agua que se ha ido evaporando a lo largo del fraguado. Se tiene que añadir abundante agua para permitirle al hormigón que desarrolle todas sus funciones.

1.1.4. Adiciones

Son elementos inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que sirven para mejorar propiedades o características del hormigón. No afectan negativamente a la mezcla ni a su durabilidad, únicamente la mejoran. Estos elementos son añadidos en el momento de la fabricación del hormigón, y los hay de dos tipos: cenizas volantes y humo de sílice.

1.1.5. Aditivos

Su naturaleza es físico-química, y producen ciertos cambios en sus comportamientos físicos, químicos y mecánicos. Estos cambios se desarrollan una vez la mezcla ha endurecido. Son incorporados a la mezcla antes del amasado, y como máximo pueden ocupar un 5% del peso del cemento.

No pueden convertir un hormigón malo en uno bueno, para poder ayudar en su futuro comportamiento, primero la mezcla tiene que cumplir con las especificaciones exigidas.

En las siguientes figuras (Fig. 1.1 y Fig. 1.2) se pueden ver algunos de los tipos de estos aditivos y para qué se emplea cada uno de ellos.

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

Fig. 1.1. Tipos de aditivos.

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

Fig. 1.2. Uso de aditivos.

1.2. Armado

En una estructura de hormigón armado, las armaduras son la parte que resiste la tracción que se genera en la parte inferior de la estructura, mientras que el hormigón resiste la compresión de la parte superior, como se puede observar en la Fig. 1.3, donde se muestra cual sería la deformación de estructura.

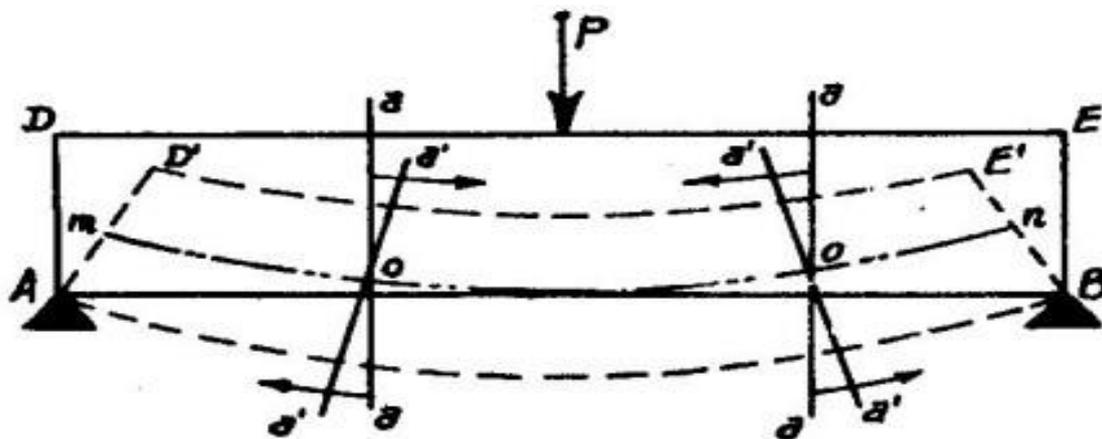


Fig.1.3. Deformación estructura hormigón armado.

Estas barras se encuentran en el interior del hormigón, y tienen que estar recubiertas por un mínimo de hormigón. Las medidas mínimas de recubrimiento se pueden ver en la Tabla 1.2.

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. Recubrimiento mínimo de las barras.

Se necesita realizar un cálculo estructural para saber el número de barras y su grosor para cada estructura.

1.2.1. Tipos de armado

En este trabajo se procede al estudio de las barras de acero y de las compuestas de polímeros reforzados con fibras.

1.2.1.1. Acero

Este material empezó a emplearse en 1740, cuando Benjamin Huntsman mezcló en un crisol hierro y carbón vegetal y lo calentó, creando así un acero de alta calidad (Revista ARQHYS, 2012).

Es una aleación de hierro con una pequeña parte de carbono, que le proporciona dureza y elasticidad. El hierro es un metal alotrópico, es decir, no tiene una única estructura reticular, sino que depende de la temperatura. (Revista ARQHYS, 2012).

Hay varios tipos de acero, como el acero al carbón, el cual contiene entre un 0.1 y un 1.9% de carbono; y el acero de baja aleación, al que se le añaden distintos metales para mejorar alguna de sus propiedades.

Tiene muy buenas propiedades físicas y mecánicas:

- Alta resistencia a esfuerzos de tracción y compresión. Se puede conocer cuál es su límite elástico y su esfuerzo de rotura con ensayos en el laboratorio.
- Alta elasticidad. Si se deforma por debajo de su límite elástico, este recupera su forma original cuando se retira la carga.
- Se puede soldar de forma fácil a otra pieza, permitiendo crear grandes estructuras.
- Es fácilmente moldeable debido a su plasticidad, por lo que puede adaptar diversas formas.
- Se puede cortar y perforar sin perder sus propiedades.

Pero también tiene partes negativas, como que es un transmisor de calor y electricidad, y que se puede oxidar en contacto con el aire o con el agua, llegando incluso a la corrosión 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). Además, su densidad es muy elevada en comparación a otros materiales destinados a los refuerzos en estructuras de hormigón armado, su densidad es de 7,85 g/cm³.

Las barras de acero empleadas en las estructuras de hormigón armado suelen tener unas corrugas (Fig. 1.4) en su superficie para ayudar en la adherencia con el hormigón, y gracias a que el acero es un material que resiste al desgaste, no se deteriora, aunque esté sometido a un esfuerzo de

rozamiento con el hormigón. Por otra parte, el hormigón que las recubre les impide transmitir calor y electricidad, y las protege de la oxidación.

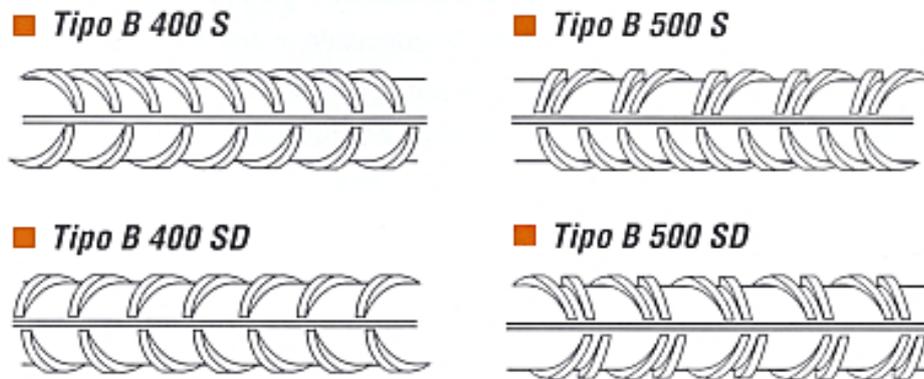


Fig. 1.4. Identificación barras según corrugas.

1.2.1.2. Polímeros reforzados con fibras (FRP)

Estos tipos de barras son materiales compuestos, los cuales están formados por unas fibras encargadas de reforzar las barras y por unas matrices poliméricas, encargadas de proteger las fibras. (Fig. 1.5)

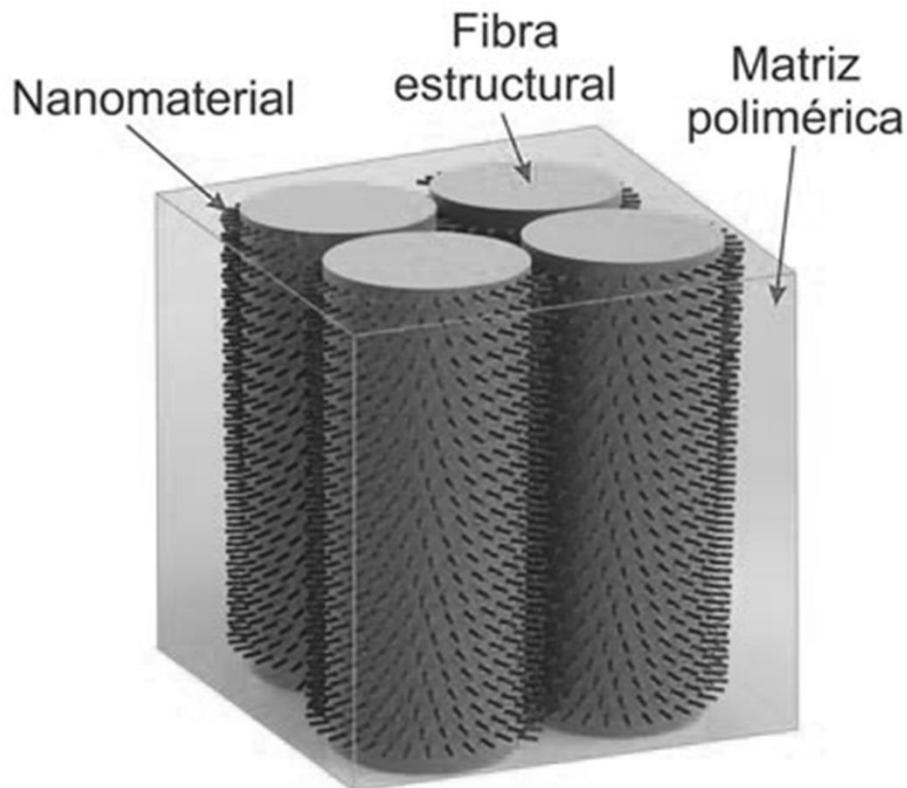


Fig. 1.5. Estructura barras de polímeros reforzados con fibras.

Estos materiales se emplean en la construcción por lo general como barras corrugadas o laminado. Esto se debe a que en algunos aspectos las barras de acero no cumplen con las necesidades de algunas estructuras, y este tipo de barras, gracias a sus grandes resistencias, si lo hacen.

Los principales beneficios de este tipo de barras son: muy buena resistencia a tracción, alta rigidez, buena resistencia a la corrosión, resistencia química y control de su dilatación con temperaturas altas (J. Torres, 2018).

1.2.1.2.1. 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):

- Proteger las fibras, garantizando que estas permanezcan en su sitio y no cambien su dirección, y a su vez protegiéndolas del ambiente exterior.
- Mantener la unión entre los elementos que forman el refuerzo, es decir, mantener las fibras unidas, pero también separarlas para no propagar las grietas en el caso de que estas se produzcan en el momento del traslado de las barras o de su manipulación.
- Distribuir y transferir las tensiones de la matriz polimétrica a las fibras. Para hacer esto posible, la matriz no puede tener un módulo de elasticidad muy alto.

Estas resinas, para poder desarrollar su función, deben cumplir lo siguiente (J. M. García):

- Ser dúctiles.
- Tener un módulo de elasticidad que no supere el de las fibras.
- El volumen de resina debe estar entre el 30% y el 60% respecto al volumen total.

Dentro de las resinas, podemos distinguir dos tipos, las termoplásticas y las termoestables.

1.2.1.2.1.1. Resinas termoplásticas

Estas resinas se encuentran en estado sólido, pero pasan al estado líquido cuando se les somete a temperaturas más elevadas que su punto de fusión, y una vez se reduce su temperatura vuelven al estado sólido de nuevo, recuperando sus propiedades originales (A. Paz, 2017).

Esto sucede porque su estructura molecular no está unida por enlaces químicos, sino que son enlaces secundarios sin mucha fuerza, por lo que sus moléculas tienen libre movimiento cuando se someten a temperaturas elevadas y presión.

Aunque este ciclo se pueda repetir, ya que el estado sólido no es definitivo, el material se debilita cada vez que es sometido a este proceso, provocando una reducción de sus propiedades mecánicas, pero otorgándole mayor dureza, lo que aumenta su resistencia al impacto y la absorción de humedad (V. Calvet, 2014).

Por otro lado, hay que tener especial cuidado durante el proceso de impregnación para asegurar el contacto entre las fibras y las resinas, ya que este tipo de resinas, al calentarse, tienen una viscosidad muy alta, y por ello son difíciles de procesar (fib bulletin 40, 2007).

Las resinas termoplásticas más utilizadas se pueden observar en la Tabla 1.3, donde además se enumeran sus características más importantes.

De todas las nombradas anteriormente, las más comunes son las PEEK. Son semicristalinas, con muy buenas propiedades químicas y mecánicas, tanto a baja como a alta temperatura. Resisten a la degradación térmica y a los ambientes exteriores. Su absorción de agua, como ya se ha dicho en la tabla anterior, es muy baja, un 0,5% de su peso a una temperatura de 23°C (Blog "Tecnología de los plásticos", 2011). En la Tabla 1.4 se pueden observar algunas de sus propiedades mecánicas.

RESINAS	PROPIEDADES
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia al calor - Tenacidad
Policloruro de vinilo (PVC)	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia y rigidez - Baja tenacidad - Buena resistencia a ácidos
Policarbonados (PC)	<ul style="list-style-type: none"> - Cristalino - Buenas propiedades mecánicas
Polietileno (PE)	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia a agentes químicos - Buenas propiedades mecánicas - Aislante eléctrico - Muy blando
Polipropileno (PP)	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia a agentes químicos - Buenas propiedades mecánicas - Aislante eléctrico
Polisulfona (PSU)	<ul style="list-style-type: none"> - Gran deformación al fallo - Gran estabilidad a altas temperaturas y humedades
Polieter eter cetona (PEEK)	<ul style="list-style-type: none"> - Alto rendimiento - Gran tenacidad - Absorción de agua baja

Tabla 1.3. Propiedades resinas termoplásticas.

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 PEEK.

1.2.1.2.1.2. Resinas termoestables

Son amorfas, con una estructura molecular entrecruzada o ramificada. Estas resinas cambian cuando se les aplica calor, pero su cambio es irreversible, una vez estas se han curado, ya no pueden volver a modificarse, aunque se les aplique calor, antes rompería que se fundiría. Esto sucede porque durante el curado las cadenas poliméricas reaccionan entre sí, con la ayuda de un agente catalizador, creando macromoléculas que van en todas direcciones y que están unidas por fuerzas covalentes. A diferencia de las resinas termoplásticas, estas resinas endurecen gracias a reacciones químicas, creando una red tridimensional que le otorga al material unas propiedades mecánicas, térmicas y resistencia química muy elevadas. ("Características de los termoestables").

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

- Más rígidas que las termoplásticas.
- Frágiles, ya que tienen una ductilidad y resistencia al impacto baja.
- Menos solubles.
- Funcionan a temperaturas más altas, ya que no cambian su forma.
- No se pueden volver a fundir.
- No se pueden reciclar, ya que no pueden variar su forma por sus enlaces.

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

1.2.1.2.1.2.1. Resina epoxi

Estas resinas tienen un bajo peso molecular, las cuales poseen grupos epoxis. Estos grupos están formados por anillos de dos carbonos y un oxígeno.

El curado de estas resinas para endurecerlas se realiza añadiendo un endurecedor, como podría ser el DETA, que reacciona químicamente con los grupos epoxis y crea una red de tres dimensiones (Fig. 1.6). En la Fig. 1.7 se muestra la estructura química de estas resinas.

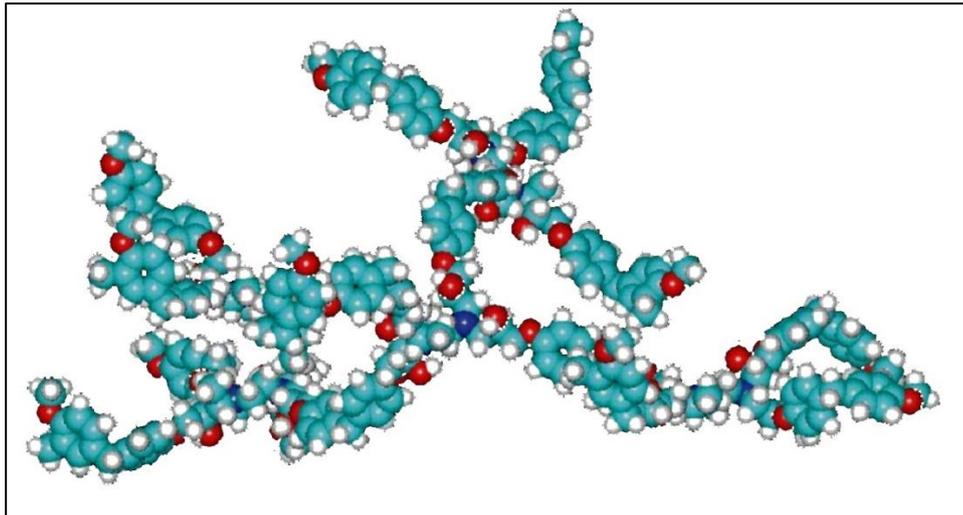


Fig. 1.6. Resina epoxi estructura 3D.

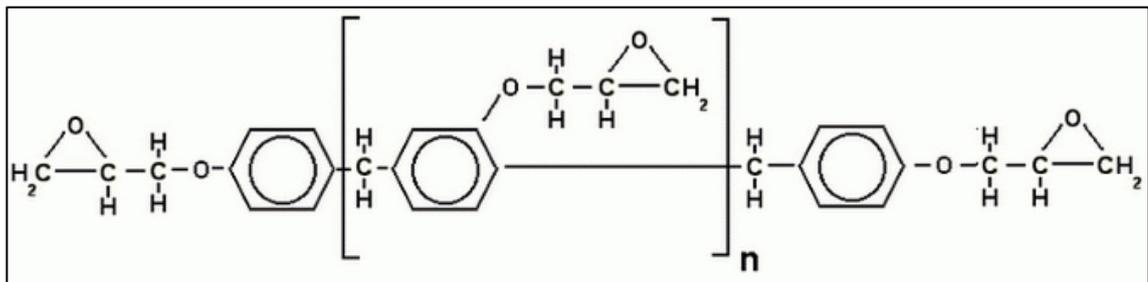


Fig. 1.7. Estructura química resina epoxi.

Las propiedades de esta resina varían dependiendo del tipo de endurecedor que se emplea en el curado, con algunos el curado se puede realizar a temperatura ambiente, y con otros se necesitan temperaturas más altas. En general, estas resinas, una vez curadas, suelen tener una alta resistencia, poca pérdida de volumen en el curado, gran adherencia a las fibras, buena resistencia química y baja toxicidad. Sus propiedades se pueden observar en la Tabla 1.5.

Su tiempo de endurecimiento puede incluso ser superior a las 24 horas en una temperatura ambiente, pudiendo someterse posteriormente a un post curado en lámparas de matriz epoxídicas para garantizar su completo entrecruzamiento, es decir, para garantizar su paso de estado líquido a sólido (M. González, 2014).

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

Tabla 1.5. Propiedades resina epoxi.

Algunas de las ventajas y desventajas de esta resina son (F. A. Herrera):

Ventajas

- Altas propiedades térmicas y mecánicas.
- Resistencia al agua más elevada.
- Alta resistencia térmica.
- Pérdida de volumen baja en el curado.

Desventajas

- Más caras.
- Tiempo de curado alto.

1.2.1.2.1.2.2. Resina de poliéster

Son las resinas más utilizadas en cuanto a materiales compuestos. Principalmente está compuesta por dos elementos, el poliéster insaturado y un solvente que suele ser estireno (M. González, 2014).

El estireno nombrado anteriormente tiene dobles enlaces de carbono, y es el elemento que durante la polimerización hace que las moléculas de poliéster se unan en los puntos de insaturación (V. Calvet, 2014).

En la Fig. 1.8 se muestra la estructura química de la resina de poliéster.

Las ventajas y desventajas de esta resina son (A. Gil, 2012):

Ventajas

- Uso fácil.
- Más económicas.
- Viscosidad baja.
- Rapidez en el curado.
- Buena resistencia química.

Desventajas

- Propiedades mecánicas no tan buenas.
- Pérdida de volumen en el curado.
- Resistencia a fatiga mala.

1.2.1.2.1.2.3. Resina de vinil éster

Se trata de una resina insaturada, nacida de la reacción entre la resina epoxi y ácidos acrílicos o metacrilatos. En su estructura (Fig. 1.9) se puede observar que en los extremos de cada molécula de vinil éster se crean unos enlaces dobles C=C, esto hace que haya menos enlaces lo que le otorgara más flexibilidad una vez esta esté curada. La reacción inicial da lugar a un material que, mezclado con un ácido monocarboxílico insaturado, crea un material menos viscoso y con menos enlaces en los puntos de las moléculas de vinil éster (V. Calvet, 2014).

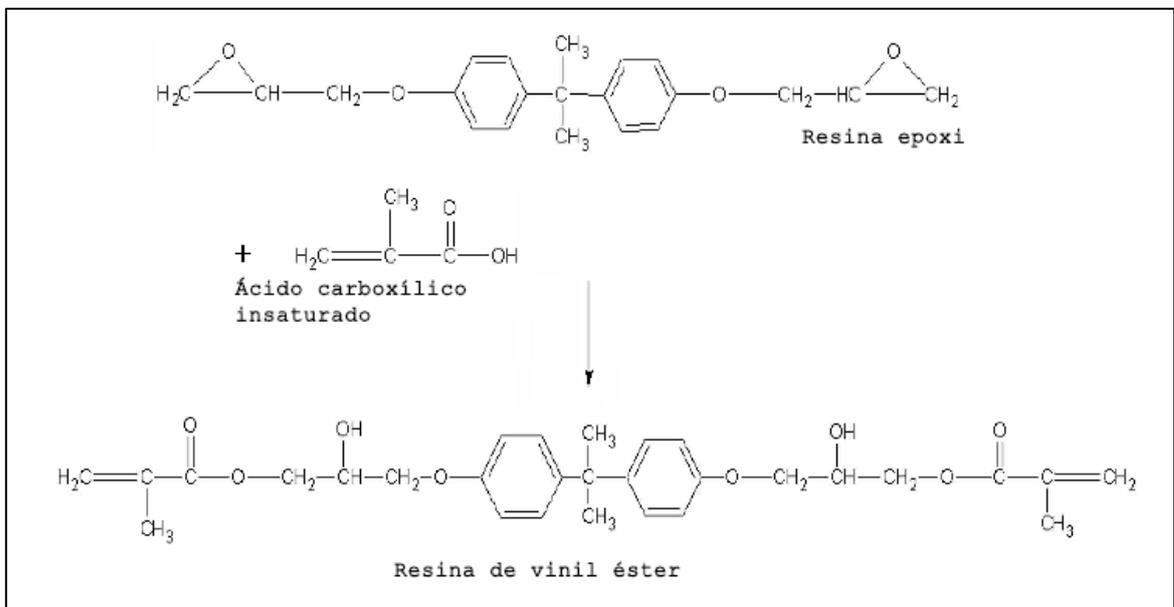


Fig. 1.9. Estructura resina de vinil éster.

Las ventajas y desventajas de la resina de vinil éster son las siguientes (A. Gil, 2012):

Ventajas

- Resistencia química y a exteriores elevada.
- Mejores propiedades mecánicas.

Desventajas

- Necesita un post curado para alcanzar las propiedades mecánicas requeridas.
- Coste más elevado.
- Alta pérdida de volumen en el curado.

1.2.1.2.2. *Fibras*

Los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras poseen miles de filamentos con un diámetro micrómetro. Estas fibras actúan como refuerzo de los polímeros anteriormente explicados, y aunque su resistencia mecánica sea mucho mayor que la de los polímeros, estas no pueden emplearse como material de construcción por sí solas, necesitan de estos polímeros para obtener una elevada resistencia mecánica (L. Colin, 1956).

La parte más fuerte de las fibras es la longitudinal, y la más débil la transversal. Estos elementos pueden ser continuos o discontinuos, pero los productos realizados con las fibras continuas son mucho más fuertes (H. V. S. GangaRao, 2006).

Se van a analizar los refuerzos de fibra de carbono, de fibra de vidrio y de fibra de basalto.

1.2.1.2.2.1. *Fibra de carbono*

Estas fibras contienen como mínimo un 90% de su peso de carbono. Aquellas que contienen más de un 95% son llamadas "fibras de grafito". Para procesar estas fibras se pueden emplear numerosos precursores, pero los más utilizados son el poliacrilonitrilo (PAN), el Pitch (es castellano se traduciría como breá, un producto derivado del petróleo), fibras celulosas y algunas fibras fenólicas.

Se distinguen del resto de fibras por sus excelentes propiedades. Dependiendo de las condiciones a las que han estado sometidas durante su procesado, estas obtendrán unas propiedades u otras (H. V. S. GangaRao, 2006). Su densidad es de 1,6 g/cm³, mucho menor que otros materiales empleados para su misma función.

Su estructura molecular está formada con átomos de carbono que se encuentran ordenados en planos paralelos, creando una forma hexagonal.

Se encuentran unidos entre ellos por fuerzas moleculares, lo que da lugar a redes tridimensionales foliadas (Fig. 1.10) (V. Calvet, 2014).

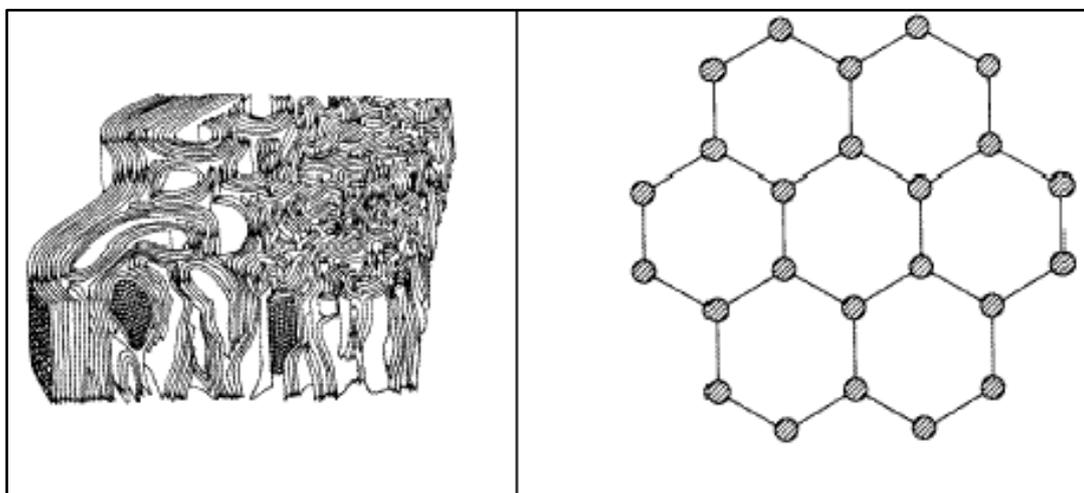


Fig. 1.10. Estructura fibra de carbono.

Para su fabricación el material pasa por 4 fases, la primera fase es la del tratamiento termoestable, en la cual las fibras se estiran a una temperatura de 400°C para ordenar las cadenas de carbono evitando que se derritan en las siguientes fases. La siguiente fase es la del tratamiento de carbonización, donde se vuelven a calentar las fibras, pero esta vez a 800°C en un ambiente libre de oxígeno para eliminar las impurezas no carbonatadas. Después pasa al tratamiento de grafitización, donde se vuelven a estirar las fibras entre un 50% y 100% de alargamiento y se llevan a una temperatura de entre 1100°C y 3000°C, esto les proporciona a las fibras una orientación cristalina y un alto módulo de Young. Para finalizar, en la última fase se realiza el tratamiento de superficie y dimensionamiento epoxi, donde se asegura la unión entre la resina epoxi y las fibras de carbono (H. V. S. GangaRao, 2006).

Estos materiales son duraderos, trabajan muy bien con temperaturas elevadas y ambientes húmedos, su absorción de humedad es nula, el aumento de volumen en su dirección longitudinal es prácticamente nulo, lo que le proporciona estabilidad dimensional, módulo de elasticidad elevado, buena resistencia a tracción y rigidez, comportamiento elástico lineal hasta rotura y buena resistencia química (L. Colin, 1956).

1.2.1.2.2.2. Fibra de Vidrio

Son los refuerzos fibrosos más utilizados, ya que es la más económica y más fácil de producir. Se trata de un refuerzo inorgánico que, a diferencia de la fibra de carbono, la fibra de vidrio tiene las mismas propiedades en su eje transversal y en el longitudinal, gracias a la estructura tridimensional de la red de vidrio.

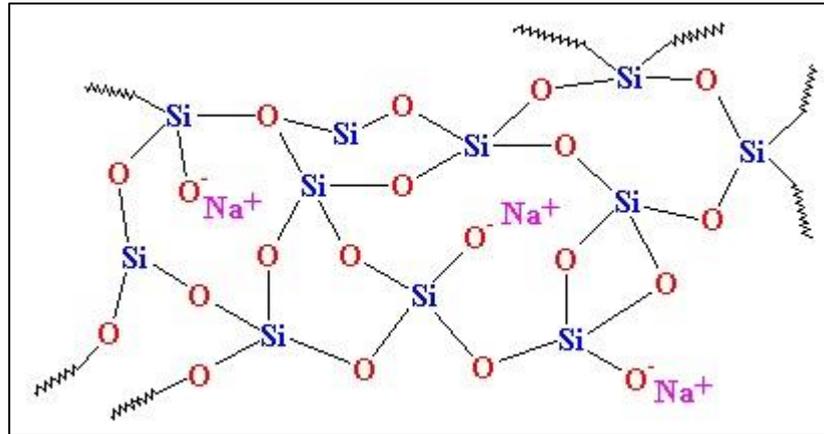


Fig. 1.11. Estructura química fibra de vidrio.

Durante su proceso, las fibras rozan unas con otras, esto provoca pequeñas grietas en la superficie de las fibras, y es lo que determina su resistencia a la rotura (*“Los materiales compuestos y sus aplicaciones en el refuerzo a cortante de estructuras”*).

El vidrio que se emplea para la fabricación de las fibras de vidrio tiene algunas variaciones en su composición para proporcionarle mejores propiedades mecánicas y para poder tener diferentes tipos de fibras con diferentes prestaciones (J. Torres, 2018).

Las fibras de vidrio presentan las siguientes características (<http://www.cursos.maximatec.com/downloads/Fibra%20de%20Vidrio.pdf>):

- Gran resistencia a tracción.
- Densidad de 2,58 g/cm³.
- Maleabilidad.
- Ligero.
- No conductor de calor y electricidad.
- Aislante térmico.
- Resistente a temperaturas elevadas.
- No combustible.
- No es tóxico.
- Buena resistencia química.

Como se ha dicho anteriormente, existen 4 variaciones de fibra de vidrio (M. González, 2014):

1. Vidrio E: se caracterizan por su aislamiento eléctrico, por sus propiedades mecánicas y por ser los de coste más bajo, lo que hace que sean los más utilizados. Su diámetro es de 9 a 15 micrómetros.
2. Vidrio C: poseen una excelente resistencia química.
3. Vidrio S: tiene unas increíbles propiedades mecánicas, su módulo de rigidez y su resistencia a tracción son las mejores de todas las fibras de vidrio, pero son las más caras.

4. Vidrio AS: Resiste muy bien a los ambientes alcalinos por su alto contenido de óxido de circonio.

1.2.1.2.2.3. *Fibra de basalto*



Fig. 1.12. Barras reforzadas con fibra de basalto.

Su fabricación se realiza fundiendo la roca basáltica y estirándola, obteniendo una especie de hilos. Poseen un alto contenido de sílice, hierro y magnesio. Esta roca, al ser volcánica, aparece como resultado del enfriamiento del magma (J. Poveda, 2012).

Tiene mejores propiedades físicas y mecánicas que la fibra de vidrio y es mucho más barata que la fibra de carbono. Los beneficios de esta fibra son: Resistencia al fuego, aislamiento acústico y a las vibraciones, y alta resistencia química (Fib bulletin 40, 2007). En la Tabla 1.7 se especifican sus propiedades.

PROPIEDADES	UNIDAD	VALOR
Diámetro de fibra	µm	9 - 23
Densidad	g/cm ³	1,9
Conductividad Térmica	W/mk	0,031 – 0,038
Módulo-E	GPa	90 – 100
Absorción de humedad		< 0,1
Elongación por tenacidad:	MPa %	3800 – 4100 4
Constante dieléctrica	Comparado con Fibra de Vidrio E	1-2 x >
Retención de peso en 3% tras 3 horas	H ₂ O 0.5N NaOH 2N NaOH 2N H ₂ SO ₄	99,6 93,4 65,4 - 77,3 66,4 - 98,5

Tabla 1.7. Propiedades fibra de basalto.

CAPÍTULO 2

PROPIEDADES DE LOS ARMADOS

En este capítulo se van a indicar las distintas propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de estas barras, así como su adherencia con el hormigón. Para ello se van a estudiar las barras reforzadas con fibra de carbono, fibra de vidrio y fibra de basalto.

2.1. Propiedades físicas

Se procede a investigar las distintas densidades, coeficientes de expansión térmica y conductividades eléctricas de este tipo de barras.

2.1.1. Densidad

La densidad es la propiedad que relaciona el volumen y la masa. La densidad de este tipo de barras se calcula partiendo de las densidades de los materiales que las forman (Ec. 3.1).

$$\rho = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde " ρ " es la densidad del FRP, la " ρ_f " y " V_f " es la densidad y el volumen de las fibras, y " ρ_m " y " V_m " es la densidad y el volumen de la matriz polimérica.

Como se puede observar en la Tabla 2.1, las densidades de este tipo de materiales son mucho menores que las de las barras de acero, lo que facilita su manipulación en la construcción y contribuye a que el transporte sea más económico (Fib Bulletin 40, 2007).

Matriz/Composite	CFRP (g/ cm ³)	GFRP (g/ cm ³)	BFRP (g/ cm ³)	Acero (g/ cm ³)
Poliéster	1,430-1,650	1,750-2,170	1,000-1,450	7,850
Epoxi	1,440-1,670	1,760-2,180	1,100-1,300	
Vinil éster	1,440-1,630	1,730-2,150	1,100-1,300	

Tabla 2.1. Densidad de las barras de FRP y acero.

Se puede decir que la densidad de las barras de fibra de carbono es unas 5 veces menor que el acero, las de vidrio unas 4 veces menor y las de basalto unas 6 veces menor.

2.1.2. Coeficiente de dilatación térmica

El coeficiente de dilatación térmica varía dependiendo del tipo de fibra, las resinas y el volumen de los constituyentes. Por una parte, tenemos las matrices poliméricas y la fibra de vidrio, que son materiales isotrópicos, y por otro lado tenemos la fibra de carbono y la fibra de basalto que son anisótropos. Esto significa que, en el caso de los isotrópicos, se comportan de la misma forma tanto en su dirección longitudinal como en la transversal, en cambio los materiales anisotrópicos tienen distintas propiedades en las distintas direcciones.

Por tanto, en el eje longitudinal (α_L) predomina el refuerzo de fibras, mientras que en el eje transversal (α_T) domina la matriz polimérica, y, por tanto, los coeficientes variaran dependiendo de las direcciones. En la Fig. 2.1 se pueden observar las distintas direcciones.

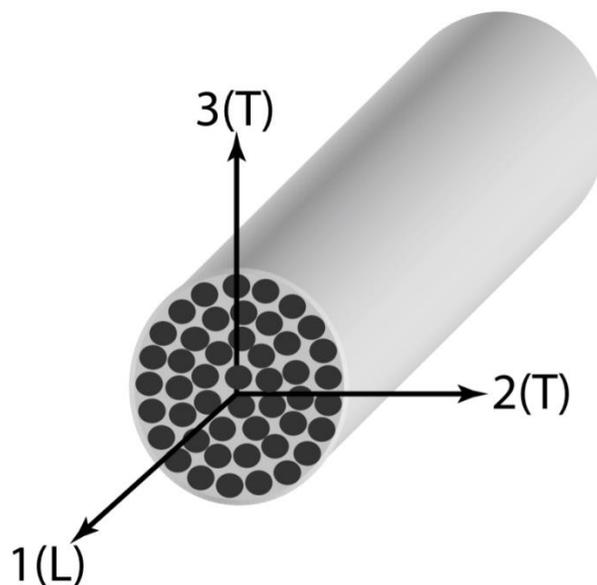


Fig. 2.1. Direcciones de barras FRP.

En el caso de la fibra de vidrio, los CTE se determinarán con las Ec. 3.2 y Ec. 3.3.

$\alpha_L = \frac{E_f V_f \alpha_f + E_m V_m \alpha_m}{E_f V_f + E_m V_m} \quad \text{(Ec. 3.2.)}$
$\alpha_T = (1 + \nu_m) V_m \alpha_m + (1 + \nu_f) V_f \alpha_f - \alpha_L \nu_{LT} \quad \text{(Ec. 3.3.)}$

Donde " α_f " es el CTE de la fibra y el " α_m " el de la matriz polimérica, " E_f " es el módulo de Young de las fibras y " E_m " el de la matriz, y donde " ν_{LT} " es el coeficiente de Poisson del compuesto, el cual se determina con la Ec. 3.4.

$$v_{LT} = v_f V_f + v_m V_m \quad (\text{Ec. 3.4.})$$

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

En cambio, para la fibra de carbono y la de basalto, las propiedades relacionadas con las fibras tendrán valores diferentes en la dirección longitudinal y transversal, y las ecuaciones que se tienen que emplear son la Ec. 3.5 y la Ec. 3.6.

$$\alpha_L = \frac{E_{fL} V_f \alpha_{fL} + E_m V_m \alpha_m}{E_{fL} V_f + E_m V_m} \quad (\text{Ec. 3.5.})$$

$$\alpha_T = V_f \alpha_{fT} + V_m \alpha_m + V_f v_{fLT} (\alpha_{fL} - \alpha_L) + V_m v_m (\alpha_m - \alpha_L) \quad (\text{Ec. 3.6.})$$

Donde “ α_{fL} ” es el CTE en la dirección longitudinal de las fibras y “ α_{fT} ” en su dirección transversal, “ v_{fLT} ” es el coeficiente de Poisson de las fibras en el eje longitudinal.

En la Tabla 2.2 se muestran los coeficientes de dilatación térmica de las barras analizadas para unos $V_f = 0,5-0,75$.

Dirección	Coeficientes de dilatación térmica ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			
	Acero	CFRP	GFRP	BFRP
Longitudinal (α_L)	11	-9 a 0	6 a 10	9 a 12
Transversal (α_T)	11	74 a 104	21 a 23	21 a 22

Tabla 2.2. Coeficiente de dilatación térmica de las barras con un V_f de 0,5 a 0,75.

Los valores negativos indican que en dichos ejes se genera una retracción al aumentar la temperatura, lo que generará un alargamiento en el eje contrario. Por lo tanto, cuando se produzca una disminución de la temperatura se producirá el efecto contrario (Fib Bulletin 40, 2007).

2.1.3. Conductividad eléctrica

Las barras de acero poseen una alta conductividad eléctrica tanto en la dirección longitudinal como en la transversal, en cambio, en las barras de FRP, esta propiedad dependerá del comportamiento de las fibras. En el caso de la fibra de carbono, puesto que se trata de un material anisótropo y puesto que la fibra de carbono es conductora eléctrica, en su eje longitudinal es

conductora eléctrica pero no en su eje transversal, ya que en este predomina la matriz polimérica, la cual tiene la función de aislar las fibras eléctricamente.

En cuanto a la fibra de vidrio y la fibra de basalto, ninguna de las dos son conductoras eléctricas, por lo tanto, aunque la fibra de basalto sea anisótropa, no es conductora eléctrica en ninguna de sus direcciones, al igual que la fibra de vidrio. En cambio, la conductividad eléctrica del acero es muy elevada, por lo que se tiene que someter a tratamientos superficiales para contrarrestarla o revestirlo con materiales que lo protejan.

2.2. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas variaran mucho dependiendo del tipo de fibra de refuerzo, ya que algunas son anisótropas y otras isótropas, y además cada tipo de fibra tiene unas resistencias mejores o peores a cada tipo de esfuerzo.

2.2.1. Tracción

Las barras son las encargadas de soportar el esfuerzo de tracción en la estructura. A continuación, se van a analizar los comportamientos de los distintos tipos de barras a tracción.

2.2.1.1. Barras de acero

Existen varias fases en el comportamiento a tracción del acero, como se puede observar en la Fig. 2.2.

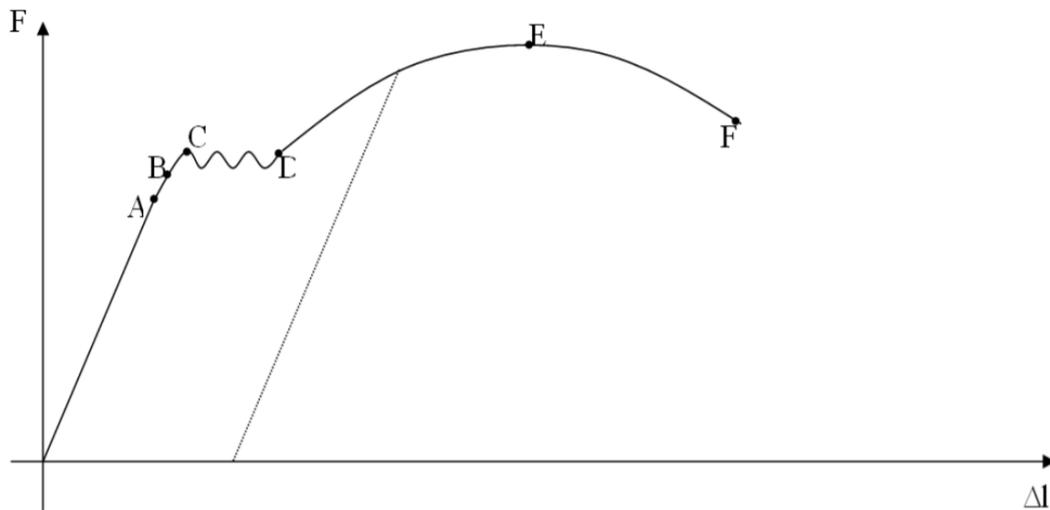


Fig. 2.2. Comportamiento a tracción del acero.

Desde el punto de tensión nula hasta el **punto A** el acero experimenta un comportamiento elástico lineal. En esta etapa el comportamiento del acero es proporcional entre la tensión y su alargamiento, y al ser elástico, una vez

retirada la carga el acero vuelve a recuperar su longitud inicial, y lo hará volviendo por la misma línea de carga. El **punto A** se conoce como el límite de proporcionalidad, a partir de este punto, la ley de Hooke, la cual relaciona proporcionalmente el alargamiento y la carga por el módulo de elasticidad, deja de cumplirse.

Entre el **punto A** y el **punto B**, se experimenta mayor alargamiento con menor carga, es decir, el alargamiento crece más que la carga, pero se sigue recuperando la longitud inicial una vez se descarga la barra, ya que sigue teniendo un comportamiento elástico hasta llegar al **punto B**, conocido como límite elástico.

Una vez superado el **punto B**, el material se comporta de forma plástica, lo que implica que una vez se descargue la barra, esta no volverá a su longitud inicial, sino que experimentará un alargamiento permanente.

Entre el **punto C** y el **punto D** se alcanza la etapa de fluencia se desarrolla una vez superado el límite elástico. Una vez la barra alcanza el comportamiento de fluencia, esta experimenta una deformación plástica sin necesidad de aplicación de ninguna carga.

Cuando supera el **punto D**, la barra experimenta grandes deformaciones plásticas, y a partir del **punto E** el alargamiento está concentrado en una única zona, denominada zona de estricción. Esta parte de la barra disminuye su sección a medida que se le aplica una mayor carga, y es la parte donde se producirá la rotura una vez alcanzado el **punto F**. El **punto E** es el punto donde se experimentan las mayores tensiones de la barra, y el **punto F** es donde la carga alcanza su máximo valor (Universidad Tecnológica Nacional)

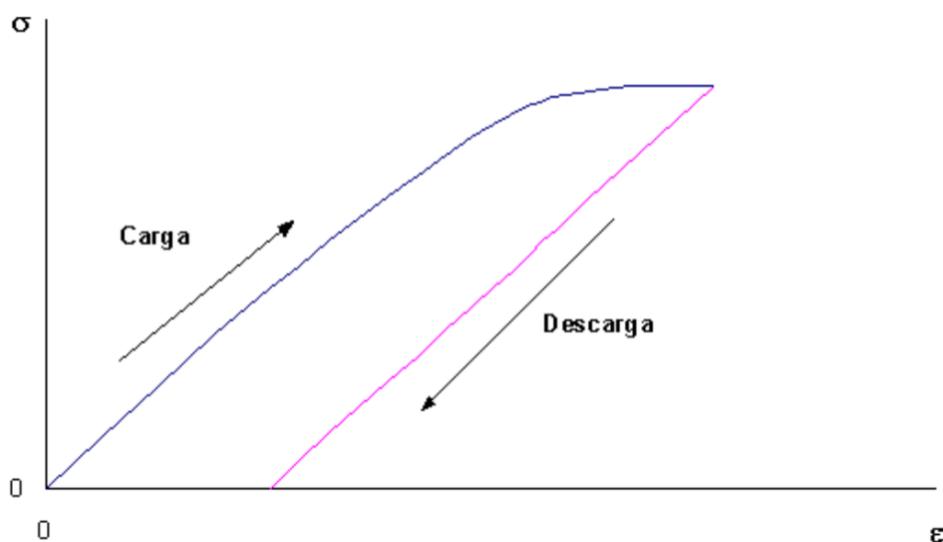


Fig. 2.3. Línea de descarga del acero sometido a esfuerzo de tensión.

A partir del **punto D**, si se retira o disminuye la carga, la línea de descarga que seguirá la gráfica será paralela a la del comportamiento lineal, cuya pendiente es el módulo de Young, pero la deformación, una vez alcanzada la tensión nula, no será 0 (Fig. 2.3). De esta forma, una vez este material se vuelva a someter a una carga, deberá alcanzar la máxima carga experimentada anteriormente para que este experimente una mayor deformación (J. M. Escacena)

La resistencia a tracción de una barra de acero es de 430 a 580 MPa.

2.2.1.2. Barras reforzadas con fibra de carbono (CFRP)

Estas barras tienen un comportamiento anisótropo, por lo que su comportamiento varía dependiendo del eje sobre el que actúa el esfuerzo. En su eje longitudinal son las fibras las que asumen el esfuerzo, mientras que en su eje transversal es la matriz polimérica la que se ocupa de ello. Esto significa que, puesto que se trata de un elemento longitudinal, su comportamiento a tracción se basa en la resistencia de las fibras de carbono.

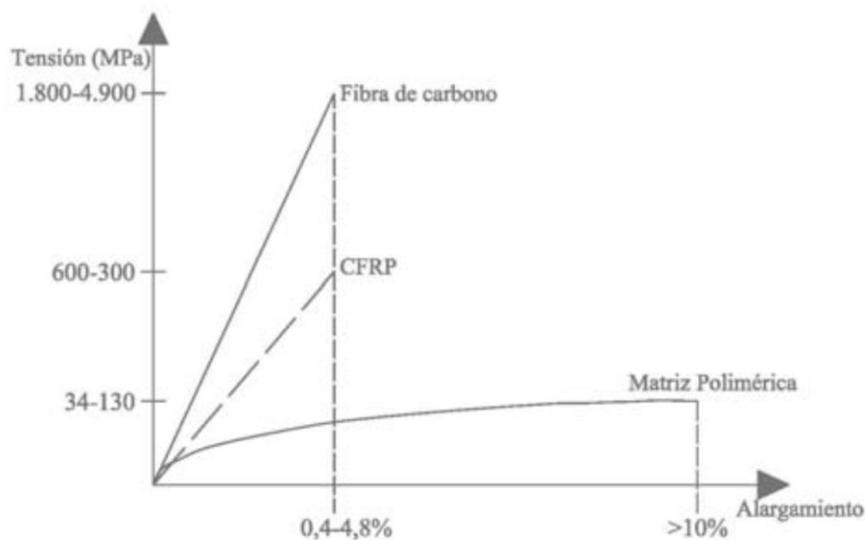


Fig. 2.4. Comportamiento a tracción de la fibra de carbono, matriz polimérica y barra de CFRP.

Como se puede observar, este tipo de barras tienen un comportamiento elástico y lineal hasta llegar a la rotura, es decir, no tienen un comportamiento plástico antes de llegar a la rotura como el acero, sino que rompen directamente sin deformarse. Esto se debe a que estas barras tienen una rotura muy frágil, cuyo alargamiento de rotura se encuentra entre el 0.5% y el 1.7%.

En este tipo de barras, a diferencia del acero, cuando se aumenta su diámetro, su resistencia a tracción disminuye. Esto es porque las fibras del

alma y las de la superficie se reaccionan de forma diferente, y por tanto las tensiones no se distribuyen uniformemente en su sección transversal (Fig. 2.5).

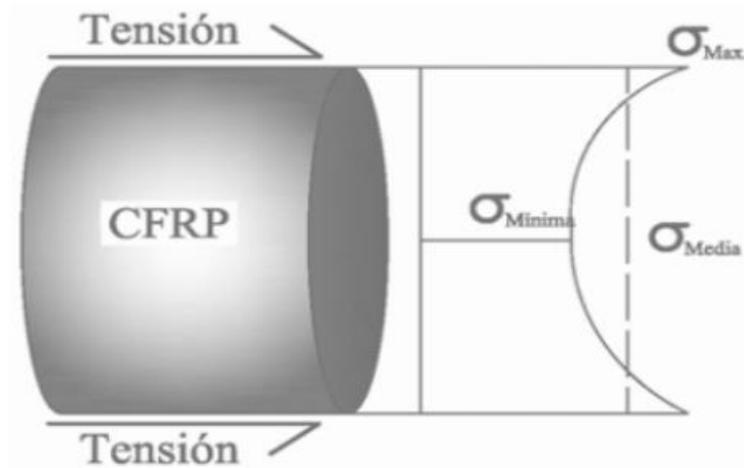


Fig. 2.5. Distribución de tensiones en sección transversal.

Otro de los factores que afectan a su resistencia a tracción es la dirección en la que se aplica la carga, ya que este tipo de barras son unidireccionales, y por ser anisótropas cuando se le aplica una carga con una dirección diferente a la longitudinal, su resistencia a tracción y rigidez varían, disminuyendo considerablemente con ángulos (θ) superiores a 15° (C. Gayón, 2017). En la Fig. 2.6 se muestra cómo influye la dirección de la carga en relación con su rigidez. Su resistencia a tracción varía entre 600 y 3690 MPa.

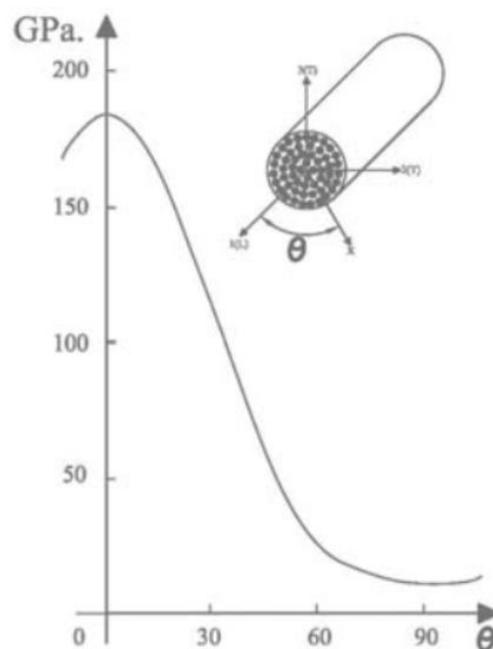


Fig. 2.6. Influencia de la dirección de la tensión en relación con la rigidez de la barra.

2.2.1.3. Barras reforzadas con fibra de vidrio (GFRP)

Aunque la fibra de vidrio tenga un comportamiento isótropo, las barras GFRP son materiales anisotrópicos, ya que en su dirección longitudinal son las fibras de vidrio las que predominan y asumen los esfuerzos, pero en la transversal es la matriz polimérica la encargada de reaccionar a los esfuerzos.

Puesto que las barras son elementos longitudinales, será la fibra de vidrio la encargada de hacer frente a los esfuerzos. En general, las barras de GFRP tienen mejor resistencia a tracción que las barras de acero, aunque esto depende del diámetro de las barras, ya que, a mayor diámetro, menor es su resistencia. Las fibras situadas en el centro de la sección transversal no se someten a tanta tensión como las de los extremos, lo que desemboca en una disminución de la resistencia cuanto mayor es la distancia entre el centro de la sección y el extremo, es decir, cuanto mayor es su radio.

El comportamiento de estas barras es lineal y elástico hasta la rotura, ya que tampoco experimentan un comportamiento plástico antes de romper. Su resistencia a tracción es de entre 500 MPa y 850 MPa, y su alargamiento de rotura de estas barras es de entre un 1.3% y un 2.3% (Fig. 2.7).

Otro de los factores que afecta a la resistencia a tracción de estas barras, aunque la fibra de vidrio no se vea afectada por las elevadas temperaturas, esto sí afecta a las barras GFRP, provocando una disminución de su resistencia a tracción, llegando a ser incluso de un 30%, 45%, 60% y 70% para temperaturas de 100°C, 200°C, 300°C y 400°C respectivamente (A. I. Almerich, 2010).

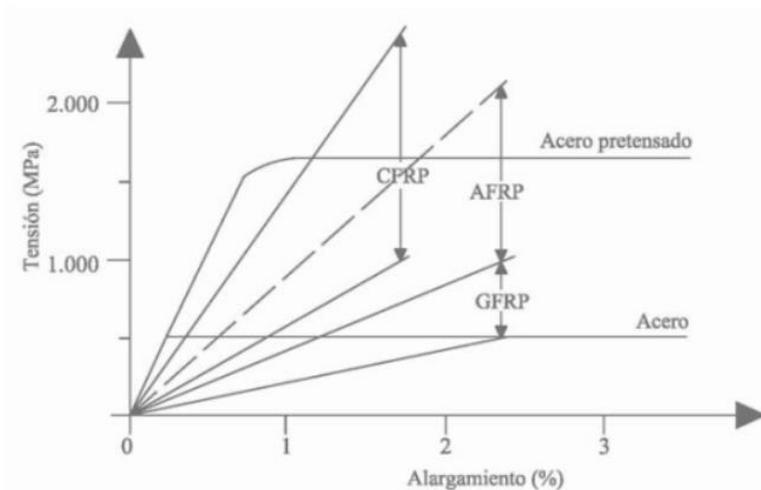


Fig. 2.7. Comportamiento a tracción de las barras de GFRP.

2.2.1.4. Barras reforzadas con fibra de basalto (BFRP)

La fibra de basalto, al ser un material anisótropo como la fibra de carbono, presentará las mismas características que este en cuanto a su resistencia a tracción, es decir, le afectará la dirección en la que se aplique la carga y se reducirá su resistencia cuando aumente el diámetro de la barra.

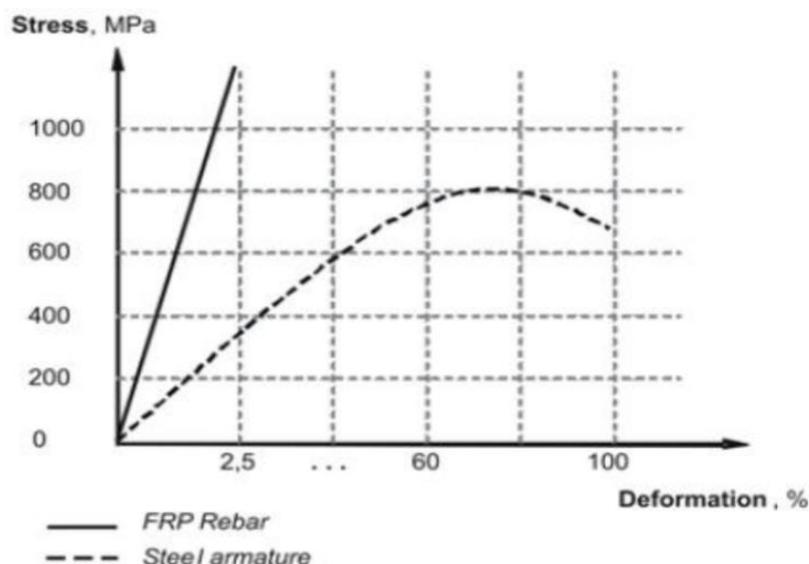


Fig. 2.8. Comportamiento a tracción de las barras de BFRP.

Al igual que los dos tipos de barras anteriores, estas barras también tienen un comportamiento lineal y elástico hasta llegar a su rotura, no tienen ni límite elástico ni plástico.

Como se puede observar en la Fig. 2.8, su resistencia a tracción es de 700 MPa a 1300 MPa y su alargamiento de rotura de 3.1% (P. Valles, 2013).

2.2.2. Compresión

No es recomendable usar este tipo de barras para que trabajen a compresión. Esto se debe a que cuando estas barras están sometidas a compresión en su eje longitudinal, el fallo se produce por rotura por micropandeo de la fibra, rotura por compresión de la matriz polimérica, rotura por doblado de la barra al someterse a compresión o rotura de la barra por cortante. La forma en la que se produce el fallo depende de las propiedades de las fibras y de la resina, así como del volumen de la fibra respecto del de la barra (Fig. 2.9) (Fib Bulletin 40, 2007).

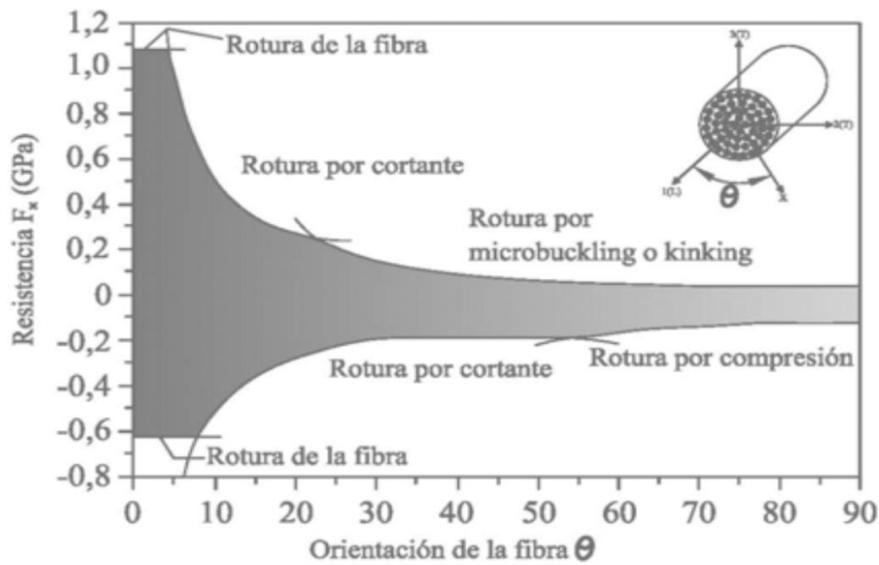


Fig. 2.9. Modo de rotura de las barras de FRP en función de la dirección de la tensión.

2.2.2.1. Barras de acero

Las barras de acero, como se menciona anteriormente, no se recomiendan como elementos para soportar cargas de compresión, ya que en las estructuras de hormigón armado es el hormigón el encargado de soportar estas cargas, y las barras de acero las encargadas de soportar los esfuerzos de tracción, por lo que se ubican en la parte de las tensiones. Esto es porque las barras de acero soportan únicamente tensiones de compresión de 215 a 460 MPa (B. Segura, 2016).

2.2.2.2. Barras reforzadas con fibra de carbono (CFRP)

Como hemos dicho, la forma en la que rompe la barra en este tipo de materiales depende del porcentaje de volumen de fibras, que, en el caso de la fibra de carbono, si el porcentaje de fibra se encuentra entre el 10% y el 40%, la rotura se producirá por cortante, pero si el porcentaje pasa a ser mayor del 40%, la rotura será por doblado de la barra al estar sometida a compresión (kinking) (Fig. 2.10). Por otra parte, el ángulo de rotura también dependerá de este factor, siendo este de 45° con un volumen del 10%, y de 64° con un volumen de hasta el 30%.

Su respuesta a compresión es casi elástico y lineal hasta la rotura, y su resistencia a compresión (450 MPa) es aproximadamente el 78% de su resistencia a tracción (V. Calvet, 2014).

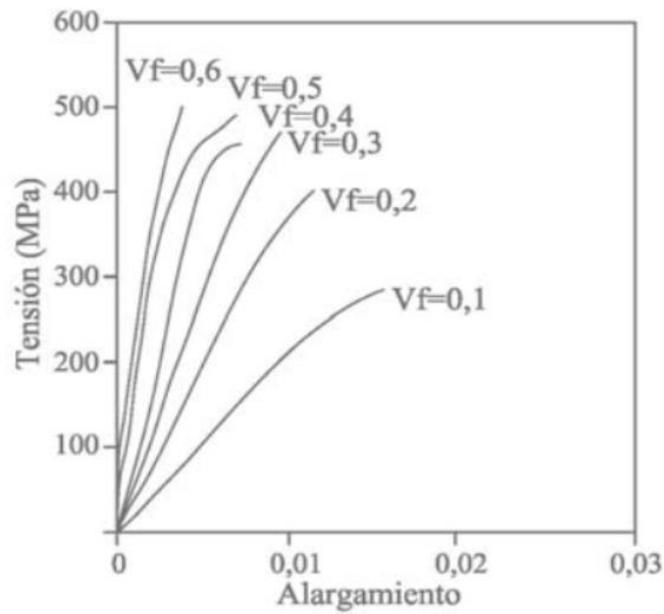


Fig. 2.10. Porcentaje de volumen de fibra de carbono en relación con la resistencia de la barra.

2.2.2.3. Barras reforzadas con fibra de vidrio (GFRP)

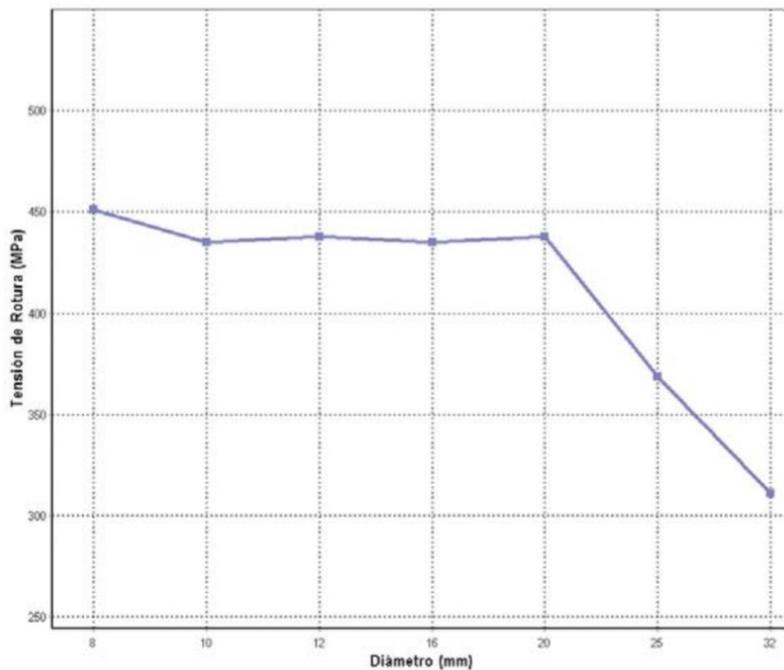


Fig. 2.11. Resistencia a compresión en relación con el diámetro de las barras de GFRP.

Su resistencia a compresión (400 MPa) es mucho menor que la de tracción, aproximadamente es un 40% o un 60% menor que la de tracción. Por ello, no es bueno emplear este tipo de barras como elemento estructural resistente a compresión (A. I. Almerich, 2010).

En el caso de la compresión en relación con el diámetro de las barras, como se puede observar en la Fig. 2.11, se produce el mismo fenómeno que en el caso de la tracción, cuanto mayor es el diámetro, menor es su resistencia.

2.2.2.4. Barras reforzadas con fibra de basalto (BFRP)

Su resistencia a compresión es buena (450 MPa), aunque no se recomienda emplear estas barras como material estructural para esfuerzos de compresión.

2.2.3. Cortante

En este caso, puesto que las fibras de refuerzo van en el sentido longitudinal de la barra y el esfuerzo a cortante se produce en la dirección transversal, es la matriz polimérica la que asume este esfuerzo, por lo tanto, la reacción dependerá de la matriz y de la distribución de tensiones (Fig. 2.12).

Este tipo de esfuerzos puede dañar la matriz sin afectar a ninguna fibra, ya que, al producirse la fuerza en el sentido perpendicular a las fibras, estas no resisten cortante, sino que actúan como elementos circulares que causan concentraciones de tensiones en la matriz.

Los valores de la resistencia de cada barra y el método de ensayo empleado para obtener dichos valores tienen que obtenerse de los propios fabricantes, ya que por el momento no se han estandarizado los métodos de ensayo a cortante.

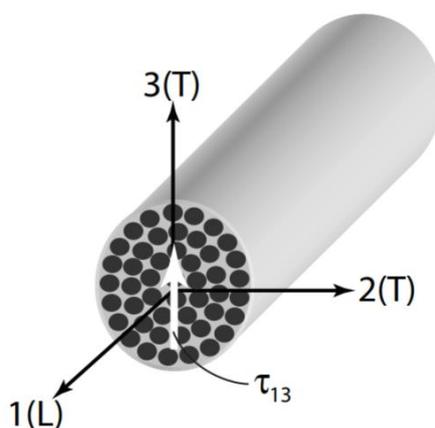


Fig. 2.12. Barra FRP sometida a una fuerza cortante transversal.

La resistencia a cortante en las barras de FRP unidireccionales se puede mejorar colocando fibras entre las capas de las fibras longitudinales con direcciones distintas a los ejes principales. Otro método para mejorar esta resistencia podría ser disponer las fibras en ambas direcciones (Fib Bulletin 40, 2007).

2.3. Durabilidad

Puesto que este tipo de barras se caracterizan por proporcionar una mayor durabilidad a las estructuras armadas con ellas, es importante analizar aquellos aspectos que influyen en su durabilidad.

El comportamiento de las barras respecto de las condiciones ambientales depende de (GangaRao et al., 2007):

- Tipo de fibra
- Resina polimérica
- Interfaz fibra-matriz
- Condiciones de curado
- Control de calidad en la fabricación
- Nivel de agresividad ambiental

Y algunas de las condiciones ambientales que podrían afectar a las barras en cuanto a su resistencia, rigidez, relación fibra-matriz, etc. son (GangaRao et al., 1995):

- Agua y agua del mar
- Soluciones químicas
- Frio prolongado
- Ciclos térmicos
- Temperaturas elevadas
- Gradientes térmicos en la barra
- Oxidación
- Radiación UV
- Envejecimiento
- Fuego

La matriz polimérica es la encargada de proteger las fibras de los daños que se les puedan ocasionar, mientras que las fibras se encargan de la resistencia mecánica de la barra, por ello se pueden añadir algunos aditivos a la matriz para mejorar sus condiciones de durabilidad (GangaRao et al., 1995; Kato et al., 1998).

El comportamiento de la resina depende de la continuidad de su superficie, por ello se tiene que tener especial cuidado con los cortes de estas barras y con el total recubrimiento de las fibras, ya que un fallo en alguno de estos casos podría afectar considerablemente a la durabilidad de la barra (Fib Bulletin 40, 2007).

2.3.1. Efecto del agua

Los efectos del agua en las barras se estudian en base a diferentes humedades relativas en el aire (% RH) a diferentes temperaturas, así como inmersas en agua a diferentes temperaturas. Esto puede provocar cambios en

el módulo de elasticidad y resistencia a tracción de las barras (Bank and Gentry, 1995).

El agua puede penetrar en la barra de dos formas diferentes (Parkyn, 1985; Rao et al., 1981).

- Por difusión por medio de la matriz polimérica: Las moléculas de agua se infiltran dentro de la matriz y se unen a los enlaces de hidrógeno del polímero, lo que aumentan la cantidad de agua.
- Por medio de grietas o poros formados en la superficie de la barra: el agua penetra por capilaridad.

El deterioro de las resinas se produce porque las moléculas de agua actúan como plastificantes de resina e interrumpen los enlaces de Van-der-Waals, lo que produce la reducción de las propiedades mecánicas, cuya pérdida puede aumentar en temperaturas superiores a 60°C y en presencia de tensión (Bank and Gentry, 1995).

Algunos estudios muestran que la resistencia a tracción de las barras cuando están en relación con el agua y con temperaturas medias de 25-60-70 °C no experimenta cambios considerables a lo largo de 1 año de ensayo. Esto se debe al tipo de matriz polimérica, ya que, si se emplean resinas termoestables, su absorción de humedad es menos y por tanto menos influencia tiene en ellas (V. Calvet, 2014).

2.3.2. *Efecto de los Cloruros*

Una de las aplicaciones de estas barras es su uso estructural en ambientes salinos, donde el acero es fácilmente corrosible si no se protege. Algunos estudios realizados, donde se han expuesto estas barras a ambientes con una concentración de cloruro de hasta un 4% y donde se ha ido variando la humedad relativa del ambiente y la temperatura (de 20 a 70°C), se demuestra que la reducción de resistencia mecánica de las barras de fibra de carbono es insignificante, mientras que en las fibras de vidrio y de basalto se reduce un 50%.

2.3.3. *Efecto de los Álcalis*

Se piensa que el hormigón protege a las barras de refuerzo, pero estas se pueden ver afectadas por su alcalinidad. Las barras que más afectadas se ven por este efecto son las de acero y las de fibra de vidrio, seguido de las de fibra de basalto y por último las de carbono (Machida, 1993).

La reacción de las barras a este ataque dependerá de los siguientes factores (Fib Bulletin 40, 2007):

- Tipo de fibras y lo susceptibles que sean a este efecto
- Tipo de resina utilizada para proteger las fibras
- Enlace fibra-resina, ya que el álcali podría penetrar por él y atacar a las fibras

- Temperatura
- Cantidad de álcali presente en el hormigón
- Movilidad de iones alcalinos

No existe un método aceptado para probar cómo afecta esta acción a las barras, por lo que se han realizado numerosos estudios con distintos métodos, barras, resinas, temperaturas, tiempos, etc. dando lugar a resultados muy diversos. En la tabla 2.3 se pueden observar algunos de los resultados de estos estudios, mostrándose en ella el autor de los ensayos, los materiales ensayados, las resinas empleadas, el PH, el ambiente, la temperatura, la duración del ensayo y la resistencia perdida.

Autor	Material	Resina	PH	Ambiente	Temperatura	Duración	Resistencia perdida	
Tannous et al. 1998	AFRP		12	Saturado Ca(OH) ₂	60°C	1 año	6.4%	
	AFRP		12		25°C	1 año	4.3%	
	CFRP		12		60°C	1 año	0%	
	CFRP		12		25°C	1 año	0%	
	CFRP		12		60°C	1 año	0%	
	CFRP		12		25°C	1 año	0%	
Porter 1997	GFRP		12.5-		60°C	3 meses	55%	
	GFRP		13		60°C	3 meses	73%	
	CFRP				60°C	3 meses	0%	
Allmusallam Al-Salloum 2005	GFRP	VE	>13	Pasta de cemento 1% Na ₂ O en agua del mar	40°C	4 meses	2.1%	
					40°C	8 meses	15.6%	
					40°C	16 meses	19.7%	
					40°C	4 meses	29.4%	
					40°C	8 meses	39%	
					40°C	16 meses	47.9%	
Alsayed Alhozaimy 1998	GFRP	VE+UP		Pasta de cemento 20g/l NaOH	Exterior	4 meses	20%	
	GFRP					4 meses	0%	
	GFRP	VE+UP				4 meses	30%	
	GFRP					4 meses	0%	
Weber 2004	GFRP	VE	13.7	Saturado Ca(OH) ₂ NaOH KOH	60°C	2000 h	<5%	
	GFRP	VE				60°C	2000 h	<5%
	GFRP	VE				60°C	2000 h	<5%

Tabla 2.3. Ensayos pérdida de resistencia por efecto de los álcalis.

Tras este análisis, se puede decir que la respuesta de cada barra a este ataque variará dependiendo de según su proceso de fabricación y los materiales empleados, la degradación de las barras de GFRP es mayor cuando estas se someten a soluciones alcalinas a alta temperatura, las barras de CFRP resisten mucho mejor este ataque y que las resinas de vinilo tienen mejor resistencia a los álcalis que las de poliéster (Fib Bulletin 40, 2007).

2.3.4. *Efecto de la Radiación Ultravioleta (UV)*

Este efecto solo afecta a las barras en el momento de acopio y almacenamiento, ya que una vez estas forman parte de la estructura, el hormigón las recubre y las protege de esta radiación.

Estos elementos se ven afectados con la radiación UV por daños fotoquímicos en la superficie, produciendo decoloración y dando lugar a un menor peso molecular, lo que reduce su durabilidad (Kato et al., 1998).

Una exposición prolongada a esta radiación puede dar como resultado el deterioro de la resina que protege las fibras, lo que provocaría la exposición de estas, la penetración de humedad y el agrietamiento de la matriz, es decir, afectaría gravemente las propiedades de los compuestos (GangRao et al. 1995).

Esta acción afecta más a las fibras de vidrio que a las de carbono y basalto, así como también se ha demostrado que es más dañina para los compuestos delgados que para los gruesos.

Para contrarrestar este efecto, se añaden inhibidores de radiación UV a las resinas durante su fabricación (H. V. S. GangaRao, 2006).

2.3.5. *Efecto de la temperatura*

El deterioro producido por este efecto se debe a que los materiales que conforman las barras tienen distintos coeficientes de expansión térmica longitudinal y transversal, lo que afecta a su unión (Fib Bulletin 40, 2007).

Esta acción afecta en gran medida a la absorción de humedad de las barras y a sus propiedades mecánicas (Allred, 1984) cuando estas están sometidas a elevadas temperaturas (de 37°C a 190°C).

La temperatura de transición vítrea (T_g) es aquella a partir de la cual la matriz pierde su rigidez, esto ocurre porque su módulo elástico se reduce por cambios en su estructura molecular (Fried, 1995). La T_g disminuye en presencia de humedad (Fig. 2.13).

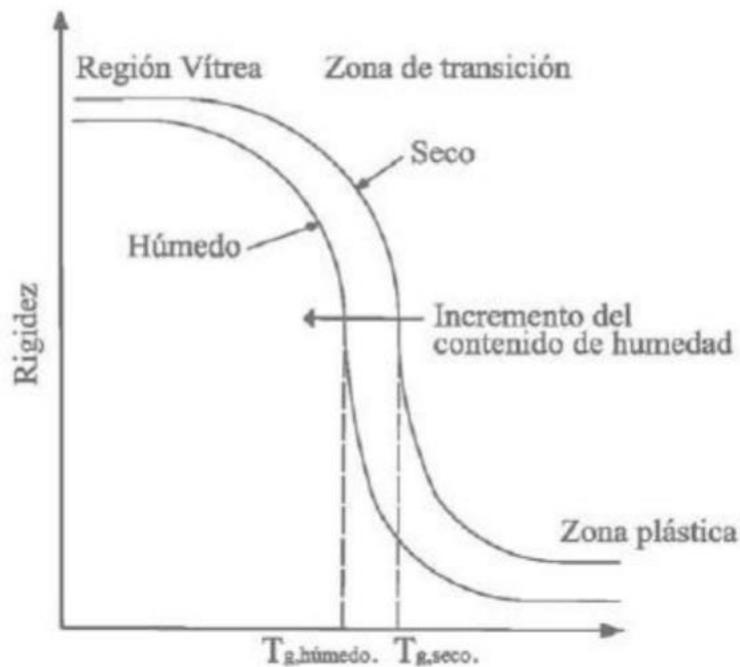


Fig. 2.13. Variación de la T_g en relación con la rigidez del polímero en presencia de humedad.

Esta temperatura se conoce como la temperatura crítica de las barras de FRP, y en este tipo de materiales empleados para aplicaciones estructurales se puede decir que está entre los 65 y los 120°C, aunque la degradación de su resistencia y rigidez se pueda producir antes de llegar a esta temperatura (Blontrock et al., 1999).

Las fibras de carbono, vidrio y basalto tienen una gran resistencia a elevadas temperaturas, pero puesto que la transmisión de las tensiones internas de las barras no depende únicamente de las fibras, sino que hay que tener en cuenta la adherencia entre la matriz y las fibras, su resistencia mecánica disminuirá, ya que dependerá de la resistencia que oponga la matriz a estas temperaturas. En cambio, el acero sí se ve afectado por este efecto, ya que, en comparación con su resistencia habitual, cuando éste se somete a temperaturas de 870°C, su resistencia es del 15% ("Acero material estructural", 2015). También se ve afectada la adherencia del armado y el hormigón.

Y. C. Wang et al., 2007, realizó un estudio sobre cómo se comportaban las barras de CFRP cuando se sometían a elevadas temperaturas (20, 100, 200, 400 y 600°C). En ellos se observó una reducción de la resistencia a tracción y módulo elástico, como se puede ver en la tabla 2.4. la Fig. 2.14 y la Fig. 2.15.

Diámetro	Temperatura (°C)	Resistencia (MPa)	Módulo (GPa)
9,5 mm	20	1260	121,41
	20	1280	126,50
	100	993,21	105,10
	100	1283,62	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 2.4. Resultado estudio realizado por Y. C. Wang et al. en 2007 sobre la resistencia a tracción de las barras de CFRP sometidas a elevadas temperaturas.

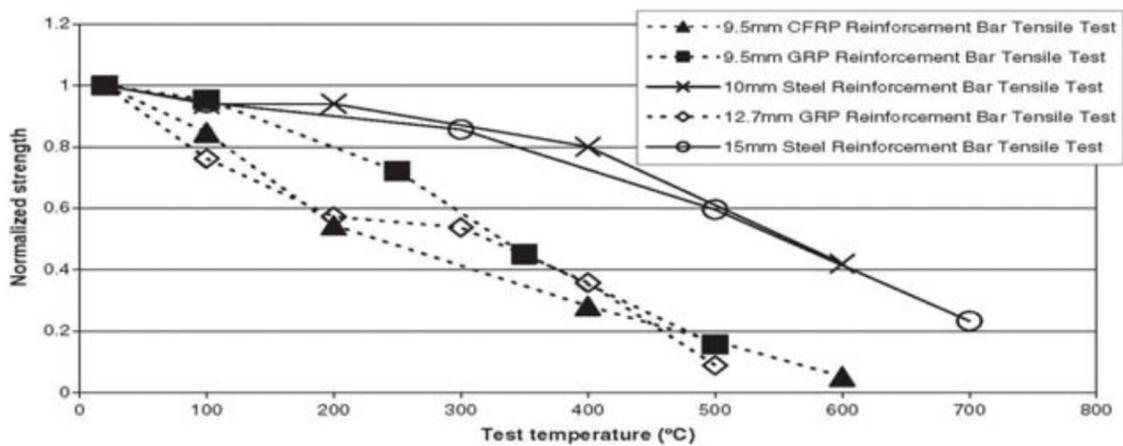


Fig. 2.14. Comparación de resistencias a tracción en barras de FRP y de acero a distintas temperaturas.

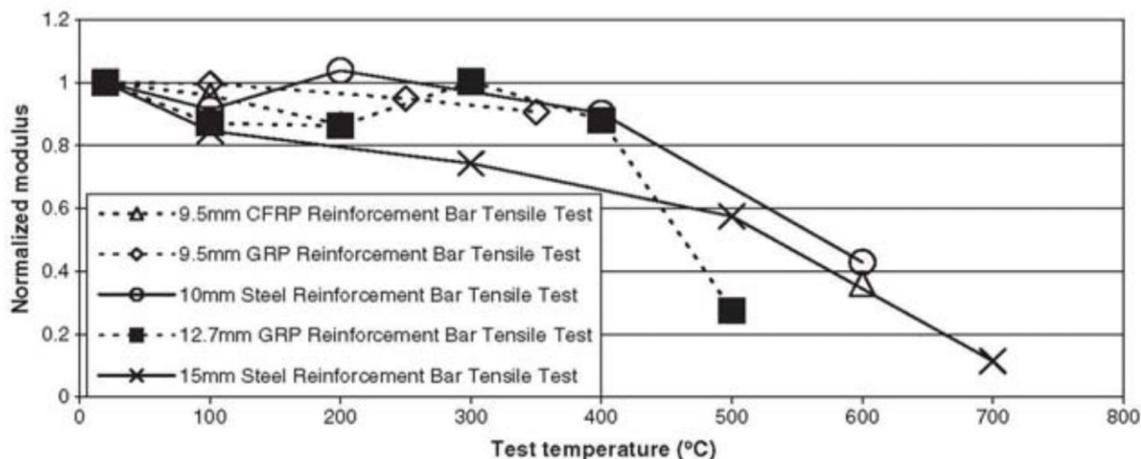


Fig. 2.15. Comparación del módulo elástico en barras de FRP y de acero a distintas temperaturas.

2.3.6. Efecto de la carbonatación del hormigón

Este efecto solamente ha sido estudiado por un proyecto, por el EUROCRETE, en el cual no se detectó que este fenómeno afectara a la durabilidad de las barras, sino que aumentaba su vida útil (Fib Bulletin 40, 2007).

Sheard et al., (1997), finalizó su investigación con las siguientes palabras:

“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”.

2.4. ADHERENCIA HORMIGÓN-ARMADO

Este es un factor muy importante en lo que respecta a la eficiencia de la estructura, ya que, si no existe una correcta adherencia entre la armadura y el hormigón, no importa lo resistente que sea el armado. Para que la estructura pueda funcionar como una sola pieza, la adherencia entre todos sus componentes tiene que ser la adecuada. Esto es posible gracias a que el hormigón genera tensiones de corte en la superficie de la barra, lo que da lugar a la transferencia de tensiones entre el hormigón y el armado (V. Calvet, 2014).

2.4.1. Factores que influyen en la adherencia

Existen numerosos parámetros que influyen en la adherencia entre el hormigón y el armado. No depende únicamente de un elemento ni de un factor, sino que varía en función de las propiedades del hormigón y del armado, así como también depende del diseño y el proceso de fabricación. Además, se ve afectado por el paso del tiempo.

2.4.1.1. *El hormigón*

- Resistencia a compresión: Cuanto más aumenta la resistencia a compresión en hormigones de altas prestaciones, menor es la longitud de transmisión, pero esto no afecta a hormigones autocompactantes y hormigones convencionales (Martín, 2002).
- Resistencia a tracción: la rotura por hendimiento se produce porque el anillo de tracción en el recubrimiento alcanza la resistencia a tracción del hormigón, por tanto, si la resistencia aumenta, más costará que este rompa y mejor será la adherencia (L. A. Caro, 2012).
- Relación agua/cemento: este es uno de los parámetros más importantes en la adherencia en lo que al hormigón respecta, tanto en estado fresco como endurecido. Cuanto mayor sea la relación agua/cemento, menor será la adherencia (L. A. Caro, 2012).
- Compactación: es necesario que exista un grado de compactación adecuado y uniformidad en el hormigón, de esta forma la adherencia será mucho mejor (Marshall, 1949).
- Retracción: este efecto provoca la aparición de tensiones de compresión en el interior del hormigón que favorecen a la adherencia (Vandewalle, 1994).
- Tipo de áridos: cuanto mayor es la resistencia y calidad de los áridos, mayor es la adherencia, ya que los áridos tienen una gran influencia sobre la resistencia a tracción del hormigón (L. A. Caro, 2012), y como se ha dicho anteriormente, cuanto mayor es la resistencia a tracción, mejor es la adherencia.
- Consistencia: el hormigón, al asentarse, deja un vacío debajo de las armaduras, donde, al producirse la exudación, se aloja el agua. Por tanto, los hormigones con bajo asentamiento y por ello mayor consistencia, dan como resultado una mejor adherencia (M. C. Delgado, 2008).

2.4.1.2. La armadura

- Diámetro: Russell y Burns (1997) realizaron un ensayo para comprobar si las armaduras de 15.2 mm podían transmitir la fuerza requerida en una longitud aceptable. Los resultados desvelaron que la longitud de transmisión media en armaduras de 12.7 mm de diámetro era de 854mm, mientras que en los redondos de 15.2 mm de diámetro era de 1008 mm, por lo que se puede decir que, a mayor diámetro, mayor adherencia.
- Rugosidad de la superficie: las corrugas en las armaduras juegan un papel muy importante en la adherencia hormigón/armadura, por lo que si se combina adecuadamente la altura de la corruga, la separación entre corrugas y el diámetro de la barra, se consigue una mejor adherencia (Fig. 2.16) (M. C. Delgado, 2008).

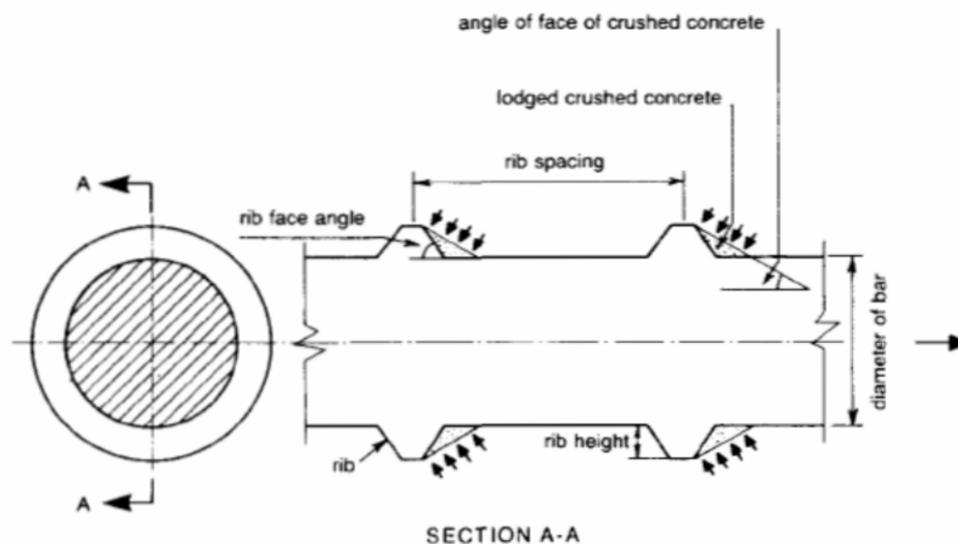


Fig. 2.16. Geometría barra corrugada.

Rehm (1968), realizó un estudio para determinar cuál serían las mejores medidas de las corrugas para estas armaduras, y concluyó que para obtener la mejor adherencia hormigón/armado, la relación entre altura y distancia entre corrugas debe de ser del orden de 0,065. En el caso de que esta relación se encuentre entre 0,05 y 0,10, la rotura se produciría por "splitting", pero si superara el 0,15, se produciría por "pullout", ya que la tensión provocada por las corrugas aplastaría el hormigón (V. Calvet, 2014).

- Características de la superficie: el estado de las corrugas es muy importante, ya que son en gran parte las encargadas de transmitir los

esfuerzos del hormigón a las barras. Por ello, hay que tener especial cuidado con la oxidación y la corrosión de las armaduras (Cairns J., 2006):

- Oxidación: se trata de una fina capa de óxido que se encuentra sobre las armaduras, lo cual ayuda en la adherencia si las dimensiones de las corrugas son las adecuadas y puede evitar una posterior corrosión.
 - Corrosión: se produce como consecuencia de la penetración de iones de cloro, oxígeno y dióxido de carbono en el interior del hormigón, desestabilizando la capa de óxido encargada de proteger la armadura. Esto genera una reducción de la sección de la armadura, debilitando así la adherencia hormigón/armado. Para evitar este tipo de problemas se pueden emplear recubrimientos para el armado a base de resina epoxy, aunque estas resinas afectan negativamente a la adherencia. La resistencia a la corrosión de las barras de BFRP es mucho mayor que la del acero
- Plastificación: la plastificación de las armaduras perjudica la adherencia de estas y el hormigón (Bigaj A. J., 1998).

2.4.1.3. *El diseño*

- Recubrimiento de hormigón: cuanto mayor recubrimiento, mayor es la adherencia, ya que, si se producen fisuras en la superficie del hormigón, estas no se transmiten tan fácilmente por todo su grosor, llegando a la armadura y provocando el hendimiento (L. A. Caro, 2012). Con valores altos de recubrimiento, se podría producir un fallo por "pull-out" (arrancamiento), mientras que con valores bajos se produciría por "splitting" (desgarramiento). Un recubrimiento igual a tres veces el diámetro de la armadura sería suficiente para evitar el fallo por "splitting" (M. C. Delgado, 2008).
- Separación entre armaduras: las grietas que se producen longitudinalmente entre las armaduras del hormigón son debidas a la energía que este puede absorber, por tanto, cuanto mayor sea la separación entre las barras, mayor energía se necesitará para llegar a la fractura del hormigón y, por lo tanto, mejor será la adherencia (McCabe; Darwin, 1992). La separación idónea para evitar la fisuración es de 3 a 3.5 veces el diámetro del armado (Cousins et al., 1994).
- Posición de las armaduras durante el hormigonado: la adherencia será mejor en aquellas armaduras que se colocan de forma horizontal próximamente al fondo del encofrado, pero esto afecta también

negativamente, ya que el recubrimiento de las armaduras es menor, lo que empeora la adherencia más de lo que la mejora esta posición (Clark A. P., 1946).

- Existencia de armado transversal: este armado ayuda con la adherencia, ya que soporta parte de las tensiones radiales que genera el armado en el hormigón, lo que reduce la fisuración por tracción del hormigón. (V. Calvet, 2014).

2.4.1.4. El proceso de fabricación

- Curado del hormigón: para conseguir una buena adherencia se necesita controlar el curado del hormigón, así como el vibrado al verter el hormigón en el encofrado (Shing et al., 2000).
- Dirección de vertido del hormigón: Martin y Noakowski (1981), realizan un estudio en el que demuestran que, si se vierte el hormigón en perpendicular a la posición de las armaduras, la adherencia es peor que si se vierte en sentido paralelo (Fig. 2.17).

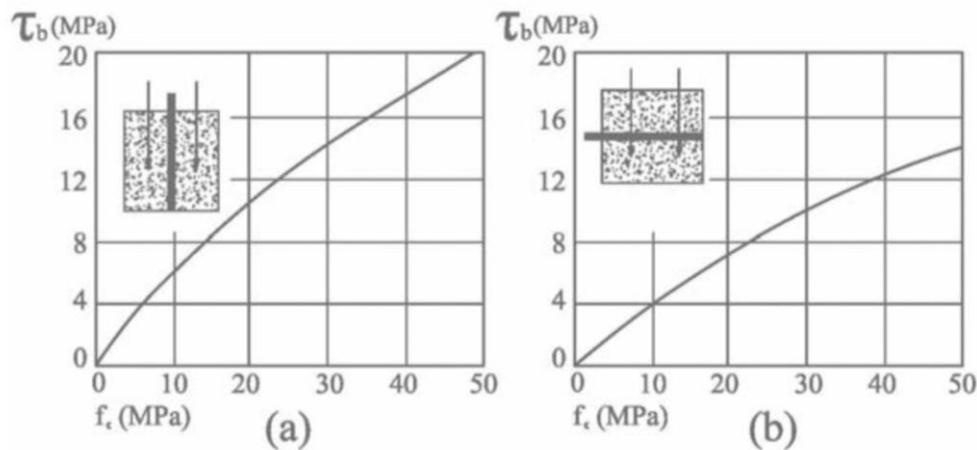


Fig. 2.17. Tensión adherente en función de la dirección de vertido. (a) Vertido paralelo al armado, (b) vertido perpendicular al armado.

2.4.1.5. La temperatura

Cuando la estructura se somete a altas temperaturas, la adherencia disminuye, sobre todo a partir de los 400°C (Diederichs U., 1981), en cambio, en temperaturas bajas las condiciones de adherencia mejoran (Van der Veen, 1992).

2.4.2. Adherencia hormigón-acero

La adherencia entre el hormigón y el acero se realiza por medio de acciones físicas y por rozamiento. Una vez roto el enlace químico que los adhiere, la adherencia es únicamente por rozamiento, gracias a las corrugas de las barras (I. Montava).

La adherencia física se produce por unas fuerzas capilares en la superficie de contacto del acero y el hormigón, puesto que el acero absorbe parte del cementante. En cambio, la adherencia mecánica por el rozamiento se produce por la penetración del cemento entre las corrugas de la barra por acuñamiento.

En la Fig. 2.18 se muestra una tabla de la adherencia con barras corrugadas de acero.

TABLA 8.1
CONDICIONES DE ADHERENCIA

<i>Diámetro nominal \varnothing (mm)</i>	<i>Tensión media de adherencia τ_m (N/mm²)</i>	<i>Tensión máxima de adherencia τ_{max} (N/mm²)</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	$\geq 4,00$	$\geq 6,66$

Fig. 2.18. Efecto de adherencia entre hormigón y barras de acero.

2.4.3. Adherencia hormigón-CFRP

Debido a la gran variedad de barras de CFRP que existen hoy en día, es muy complicado fijar un comportamiento de adherencia común para todas las barras de este tipo. Por lo tanto, no se puede hablar de un único comportamiento en lo que respecta a este tipo de barras.

Para hablar de la adherencia de las barras de CFRP, antes se debe realizar un análisis de los tipos de barras que existen dentro de este grupo (Fig. 2.19).



Fig. 2.19. Esquema barras de CFRP según geometría superficial.

2.4.3.1. Barras lisas

Se han realizado numerosos estudios sobre la adherencia de este tipo de barras con el hormigón mediante ensayos de pullout. En la Fig. 2.20 se puede observar el comportamiento adherente de las barras lisas de CFRP que se ha obtenido en estos ensayos.

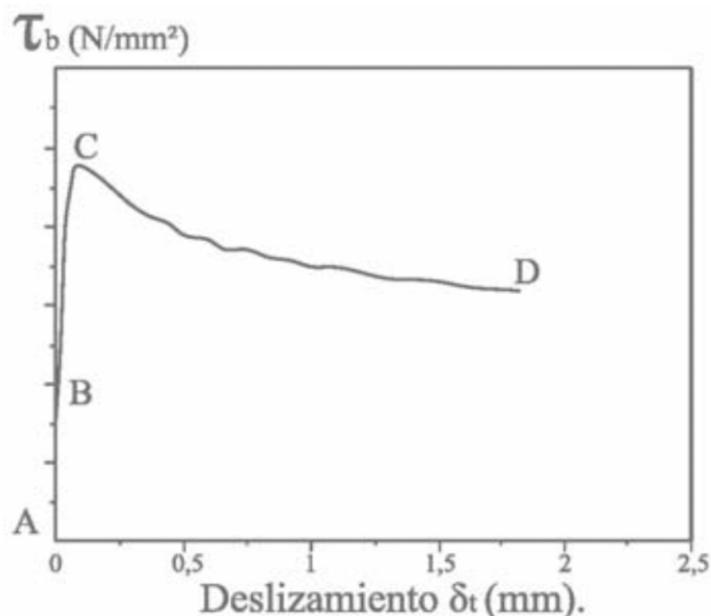


Fig. 2.20. Gráfica tensión adherente/desplazamiento entre barra lisa de CFRP y hormigón.

Se pueden observar dos claras fases en este ensayo:

- En la primera fase (Tramo AB), la barra se adhiere por razones químicas al hormigón por unos instantes, durante los cuales no se produce deslizamiento de la barra.
- En la segunda fase (Tramo BC-CD), la adherencia se sustituye por la fricción debido a la rugosidad de la superficie de la barra y el hormigón. En el tramo BC, se produce el primer deslizamiento de la barra como consecuencia del incremento de tensión adherente hasta llegar a la máxima.

Según ensayos realizados, las barras lisas de FRP no oponen mucha resistencia al deslizamiento, y, por tanto, su comportamiento adherente es muy bajo, aunque dentro de este grupo, las barras lisas de CFRP son las que más adherencia presentan (Fig. 2.21).

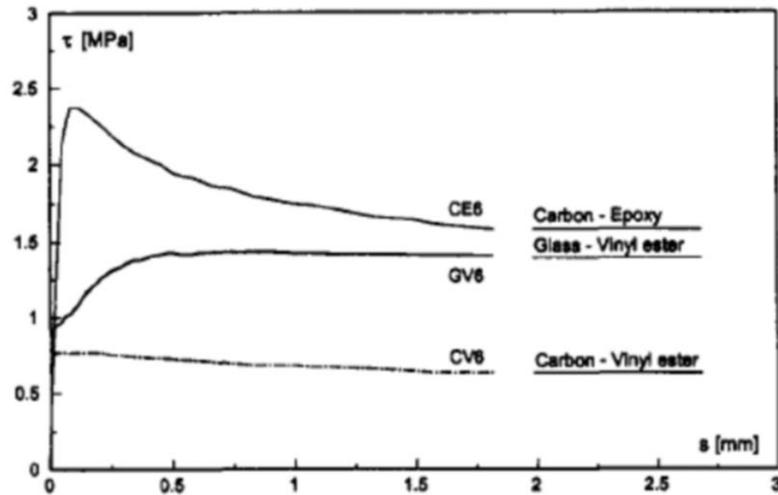


Fig. 2.21. Grafica tensión adherente/deslizamiento entre distintas barras de FRP y hormigón.

La rotura se produce por las tensiones de tracción de la barra, pero sin ninguna fisuración del hormigón, ya que estas tensiones son muy débiles (V. Calvet, 2014).

2.4.3.2. Barras corrugadas o con tratamiento superficial

En la Fig. 2.22 se muestra el comportamiento adherente general de este tipo de barras con el hormigón obtenido mediante el ensayo de pull-out.

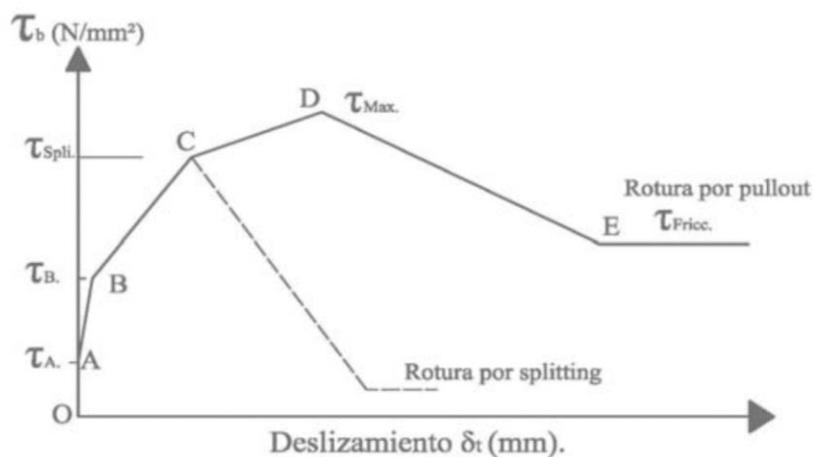


Fig. 2.22. Gráfica tensión adherente/deslizamiento entre barras corrugadas de CFRP y hormigón.

- En el tramo OA, al igual que en las barras lisas, la adherencia se produce por razones químicas y tampoco se produce deslizamiento. En esta fase, las barras corrugadas arenadas son las que mejor adherencia química presentan (Tabla 2.5).

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

Tabla 2.5. Tensiones adherentes de las barras corrugadas o con tratamiento superficial.

- El tramo AB se produce la pérdida de la adherencia química por las tensiones producidas por la barra, lo que conlleva al desplazamiento. En la Tabla 2.6 se muestran las reacciones de las distintas barras.

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

Tabla 2.6. Mecanismo de adherencia de barras corrugadas o tratamiento superficial.

Entre estos tipos, las de recubrimiento de arena son las que menor desplazamiento presentan en esta fase.

El hormigón alcanza su máxima resistencia a tracción a causa de las tensiones de adherencia, lo que genera las primeras microfisuras en el hormigón, pero puesto que las barras de CFRP tienen menor resistencia a corte que las barras de acero, esta microfisuración se produce un poco más tarde.

- En el tramo BC se produce un notable crecimiento de las tensiones y del deslizamiento, lo que se traduce en una reducción de la adherencia. Las barras arenadas son las que menor deslizamiento presentan, seguidas de las corrugadas. También se ha demostrado que, hasta el final de este

tramo, en los extremos de las barras no se produce deslizamiento (Archillides et al., 2004; Baena et al., 2009).

- Durante el tramo CD se puede llegar a alcanzar la máxima tensión adherente siempre y cuando el hormigón proporcione el confinamiento necesario para ello. Por otra parte, en los extremos de las barras se produce un deslizamiento relativo y la adherencia varía en función del tipo de barra.

Una vez alcanzada la máxima tensión adherente, se produce la rotura, la cual puede ser de 4 formas distintas: corte de las corrugas de la barra (por la resistencia a cortante de la barra), corte del hormigón (por la resistencia a cortante del hormigón), por una combinación de los dos anteriores o aplastamiento de la barra (si posee una rigidez transversal muy baja).

- El comportamiento de la barra en el tramo DE depende del modo de rotura del tramo anterior. Si la rotura se ha producido por corte del hormigón, el mecanismo de acuñamiento que ha causado esta rotura pasa a ser fricción, el cual dependerá de la rugosidad de la superficie (Nanni et al., 1995). Si la rotura se produce por el modo combinado, la adherencia se producirá por una combinación de fricción y acuñamiento (Achillides et al., 2004).

Se puede concluir que dentro de las barras de CFRP, las arenadas son las que mejor adherencia presentan (V. Calvet, 2014). En la Fig. 2.23 se muestra el comportamiento adherente de una barra de CFRP.

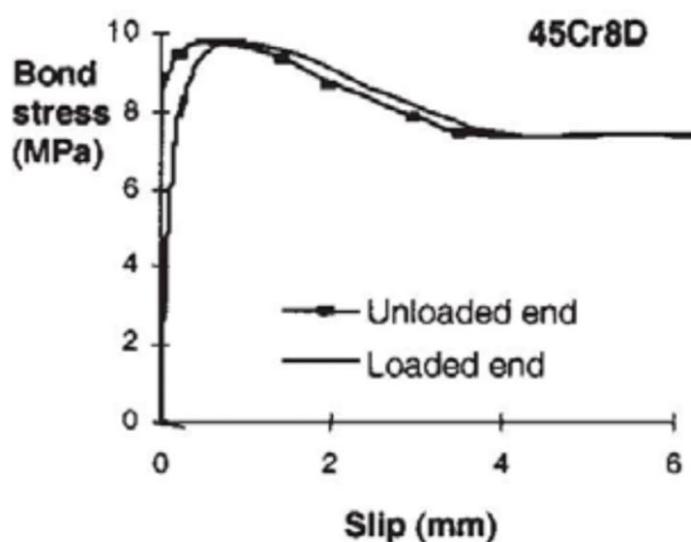


Fig. 2.23. Comportamiento adherente entre barra de CFRP y hormigón.

2.4.4. *Adherencia hormigón-GFRP*

Siempre se ha intentado buscar un comportamiento adherente similar al de las barras de acero corrugadas, pero este comportamiento depende del acabado superficial de estas, y muchas veces la tensión adherente no llega a ser como la de la barra de acero (Cosenza et al., 1997).

Aquellas barras que presentan relieve en su superficie, proporcionan unos puntos de anclaje en el hormigón que dan lugar a una mejor adherencia.

Según un ensayo de pull-out realizado por Mohammed Amine (2014), la tensión adherente media para una barra de GFRP de 10 mm es de 7,7 MPa.

2.4.5. *Adherencia hormigón-BFRP*

En estas barras, el tratamiento o geometría superficial tienen una gran influencia en su tensión adherente máxima. Puesto que su componente principal son las fibras de basalto, su superficie tiene una forma helicoidal, lo que les proporciona una mayor adherencia, similar a la del acero corrugado. Estos aspectos también influyen en su modo de rotura. Sin embargo, la temperatura no causa ninguna alteración en el comportamiento adherente de las barras de BFRP texturizadas, ya que son capaces de soportar temperaturas muy elevadas (-269° a 650°) (P. Valles, 2013).

Para determinar dicha adherencia, se debe realizar un ensayo de pull-out, el cual no es obligatorio realizar. Existen 2 tipos de ensayo, el centrado y el descentrado. Estos ensayos varían sus requisitos dependiendo de las distintas normas.

Para una correcta adherencia, la longitud adherente de las barras de BFRP tiene que ser la suficiente para que su tensión adherente se reparta en todos los estados de carga (P. Valles, 2013). Según ACI.440.3R-04, una buena longitud adherente es la de 5 veces el diámetro de la barra, mientras que según JSCE 1997 (b) esta longitud es la de 4 veces el diámetro. Otro de los aspectos que varían según la norma son el del vertido del hormigón y la velocidad de aplicación de carga.

Según el mismo ensayo nombrado en el apartado 2.4.3. (Mohamed Amine, 2014), para una barra de BFRP de 10 mm de diámetro, la tensión adherente media es de 10 MPa.

CAPÍTULO 3

COSTE DE LAS BARRAS

En este capítulo se habla tanto de los costes de los distintos armados, como del coste que supondría la realización de la estructura, tomando como referencia sus ventajas y desventajas.

3.1. Barras reforzadas con fibra de carbono (CFRP)

Estos armados tienen un precio elevado debido a su proceso de producción, el cual es muy largo y caro, puede tardar semanas o meses en transformar el polímero sintético en armado, dependiendo de las exigencias que se requieran, es decir, si se quiere mejorar alguna de sus características para que sea más resistente.

Propiedades		Fibra de carbono	Acero
Resistencia a tracción (MPa)		600-3690	483-690
Resistencia a compresión (MPa)		450	460
Densidad (g/cm³)		1,6	7,85
Coef. expansión térmica (x10⁻⁶/°C)	Longitudinal	-9 a 0	11
	Transversal	74 a 104	11
Resistencia corrosión		No corrosivo	corrosivo
Precio (€/Kg)		16	0,81

Tabla 3.1. Comparación propiedades CFRP y acero.

Actualmente, un kilo de fibra de carbono cuesta unas 20 veces más que un kilo de acero, pero esto podría cambiar en los próximos años, ya que se están realizando investigaciones a cerca de su proceso de fabricación, que podrían reducir el coste de la fibra de carbono a tan solo el doble que el del acero (H. Sarrión, 2018).

Por otra parte, este armado tiene mejor resistencia a tracción que el acero, por lo que se necesita un número menor de redondos y de menor diámetro, y a su vez, puesto que el peso de la fibra de carbono es mucho menor que el del acero, no se necesita maquinaria pesada para su transporte, lo que reduce aún más el precio. En cuanto a su resistencia a agentes exteriores, la fibra de carbono tiene mejores cualidades que el acero, por lo tanto, requiere menor mantenimiento a lo largo del tiempo.

3.2. Barras reforzadas con fibra de vidrio (GFRP)

El precio de estas barras es más asequible puesto que su materia prima se obtiene de forma más fácil y su fabricación es más rápida, por lo que su fabricación es más económica (H. Sarrión, 2018).

Al tratarse de un material deformable, no requiere personal técnico especializado. Por otra parte, Su resistencia mecánica es mayor que la del acero, por lo que, al igual que las barras de CFRP, aunque su precio sea más elevado que el del acero, se requiere menor cantidad de barras de refuerzo de GFRP que de acero y de un menor diámetro, por lo que su precio se reduce. Su peso es mucho menor que el del acero, por lo que tampoco requiere maquinaria pesada para su transporte, y a menor peso, menor es el coste total del material. Puesto que su estabilidad dimensional es elevada, y tiene una buena resistencia a la corrosión, por lo tanto, el coste de su mantenimiento se reducirá.

Propiedades		Fibra de vidrio	Acero
Resistencia a tracción (MPa)		500-850	483-690
Resistencia a compresión (MPa)		400	460
Densidad (g/cm³)		2,58	7,85
Coef. expansión térmica (x10⁻⁶/°C)	Longitudinal	6 a 10	11
	Transversal	21 a 23	11
Resistencia corrosión		Buena	Corrosivo
Precio (€/Kg)		5	0,81

Tabla 3.2. Comparación propiedades GFRP y acero.

3.3. Barras reforzadas con fibra de basalto (BFRP)

Las barras de BFRP son más caras que las barras de acero, pero debido a su elevada resistencia mecánica y a su bajo peso, el coste total del material empleado para realizar una misma estructura, es más elevado con barras de acero que con barras de BFRP. Este armado, por sus propiedades, no requiere el agregado de ningún aditivo en la mezcla del hormigón, al contrario que el acero. Al ser su peso menor, su transporte a la obra se puede realizar sin necesidad de maquinaria pesada.

Este tipo de barras, como se ha dicho anteriormente en el apartado 2.2.1.3., tienen un menor módulo de elasticidad ya que no tienen límite elástico ni plástico, por lo que se puede emplear como elemento constructivo con menor diámetro y cantidad que empleando el acero. Además, como se trata de un

elemento resistente a la corrosión, su mantenimiento a largo plazo será mucho menor (P. Valles, 2013).

Propiedades		Fibra de basalto	Acero
Resistencia a tracción (MPa)		700-1300	483-690
Resistencia a compresión (MPa)		450	460
Densidad (g/cm³)		1,9	7,85
Coef. expansión térmica (x10⁻⁶/°C)	Longitudinal	9 a 12	11
	Transversal	21 a 22	11
Resistencia corrosión		No corrosivo	Corrosivo
Precio (€/Kg)		3	0,81

Tabla 3.3. Comparación propiedades BFRP y acero.

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se procede a analizar los resultados obtenidos anteriormente con el fin de determinar que material es el más adecuado para cada tipo de construcción dependiendo de sus requerimientos.

Para llevar a cabo este análisis, se comparan las características y propiedades de las distintas fibras y del acero.

En lo que respecta a la **densidad**:

- El acero tiene la densidad más alta de estos 4 tipos de barras, siendo esta de $7,85 \text{ g/cm}^3$.
- En la fibra de carbono la densidad es de $1,6 \text{ g/cm}^3$.
- La fibra de vidrio posee una densidad de $2,58 \text{ g/cm}^3$.
- La fibra de basalto tiene una densidad de $1,9 \text{ g/cm}^3$.

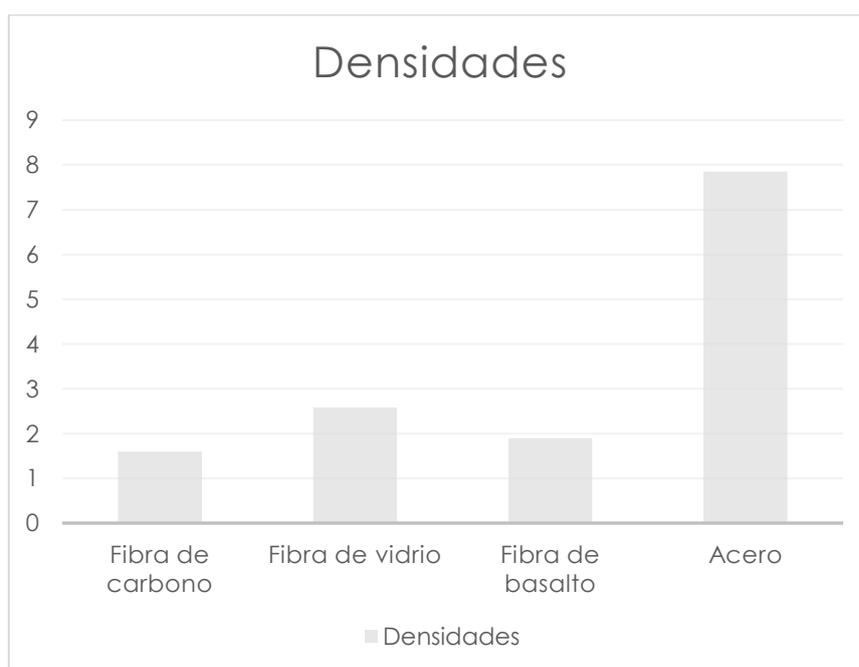


Fig. 4.1. Comparación densidades.

Aunque estas densidades variarán en función de las resinas empleadas, como se puede observar todas las barras poseen densidades menores que las barras de acero, siendo las barras de fibra de carbono y las de fibra de basalto aquellas con menores densidades, por lo que es mejor optar por alguno de estos dos materiales si se buscan estructuras ligeras, aunque la diferencia con la fibra de vidrio no es excesiva.

En cuanto a la **coeficiente de dilatación térmica**:

- La expansión térmica de las barras de acero es la misma tanto longitudinal como transversalmente, la cual es de $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.
- En las barras de fibra de carbono la expansión térmica varía en función de la dirección de la barra, siendo de $-9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ en su dirección longitudinal y de $74 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $104 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ en su dirección transversal.
- Las barras de fibra de vidrio poseen una expansión térmica de $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ en la dirección longitudinal y de $21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ en la dirección transversal.
- La expansión térmica de las barras de basalto es de $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ en la dirección longitudinal y de $21 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ a $22 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ en la dirección transversal.

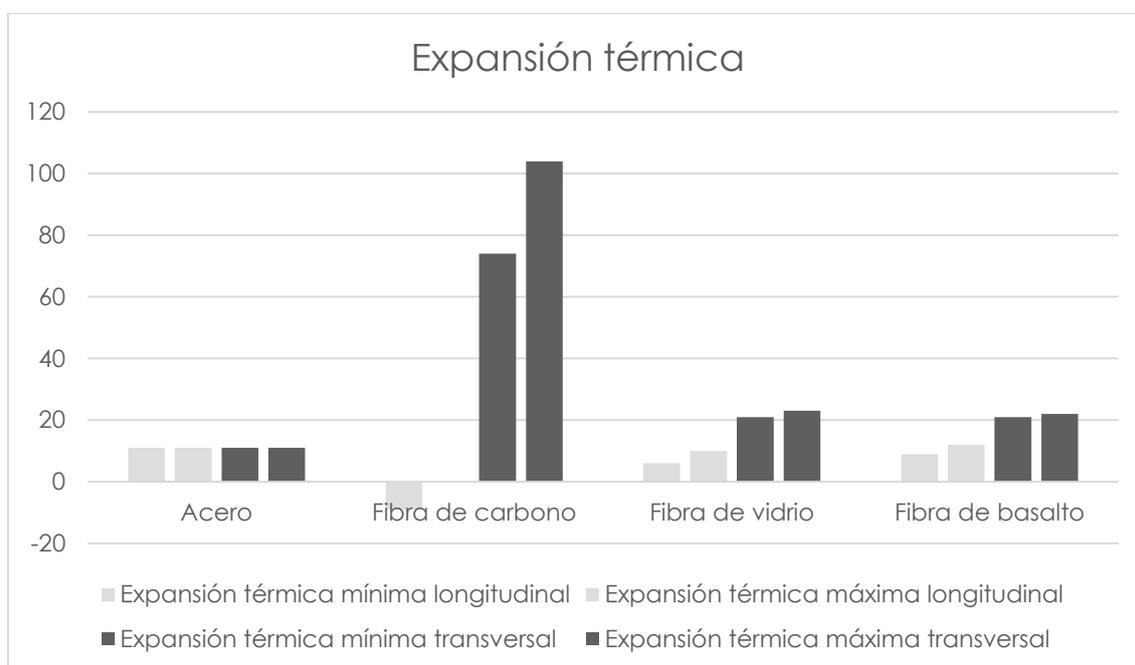


Fig. 4.2. Comparación expansión térmica.

Esta propiedad varía dependiendo de la dirección de la barra, ya que en su sección transversal la resina tiene una mayor importancia y en la longitudinal es la fibra la que domina, en cambio, el acero se comporta de igual manera en ambas direcciones. La dirección más influyente, dado que el armado es un elemento longitudinal, es la longitudinal. Como se muestra en la Fig. 4.2, la expansión térmica de estos materiales es prácticamente despreciable, siendo la del acero la menor en la dirección transversal, pero la mayor en la longitudinal, seguido de la fibra de vidrio y de la fibra de basalto en la longitud transversal, pero siendo la de fibra de carbono la menor en la dirección longitudinal. Por lo que cualquiera de estos materiales son buenos resistentes a elevadas temperaturas.

Por otra parte, la **conductividad eléctrica**:

- El acero es un material con conductividad eléctrica elevada, por lo que requiere un tratamiento superficial o un recubrimiento aislante para contrarrestar este efecto.
- Al igual que las barras de fibra de carbono, las cuales también tienen una alta conductividad eléctrica.
- Las barras de fibra de vidrio, en cambio, tienen una conductividad eléctrica nula.
- Al igual que las barras de basalto.

La fibra de vidrio y la de basalto son las que mejor aislamiento eléctrico poseen, por lo que, empleando estas barras para armar las estructuras de hormigón, no será necesario revestir las barras con ningún tratamiento.

Respecto a la **corrosión**:

- El acero es un material que no presenta resistencia a la corrosión, por lo que necesita elementos que lo recubran o tratamientos superficiales que contrarresten este efecto.
- En cambio, la fibra de carbono no es corrosiva.
- La fibra de vidrio, aunque si puede corroerse, presenta una mayor resistencia que el acero.
- La fibra de basalto, al igual que la de carbono, no es corrosiva.

Se demuestra que para edificaciones en zonas próximas a ambientes salinos, tales como zonas costeras, será más recomendable el uso de barras de CFRP o BFRP, ya que garantizarán que no se va a producir un deterioro de la armadura por corrosión.

Pensando en la **resistencia a tracción**:

- Las barras de acero poseen un límite elástico y plástico, llegando a soportar una resistencia a tracción de 430 MPa a 580 MPa.
- Mientras que las barras de fibra de carbono no poseen ningún límite plástico ni elástico, y una resistencia a tracción de 600 MPa a 3690 MPa, mucho más alta que la del acero.
- Igual ocurre con las barras de fibra de vidrio, las cuales tienen una resistencia de 500 MPa a 850 MPa.
- La resistencia de las barras de basalto a tracción es de 700 MPa a 1300 MPa.

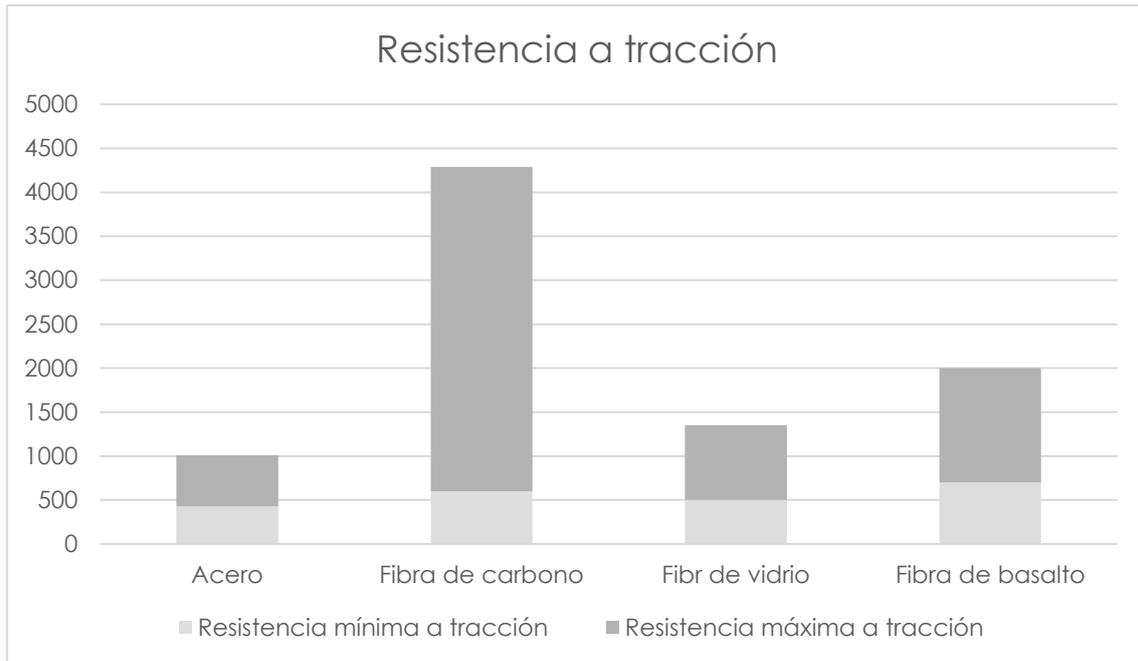


Fig. 4.3. Comparación resistencia a tracción.

Como se muestra en la Fig. 4.3, la fibra de carbono tiene una muy elevada resistencia a tracción, mucho mayor que las demás barras, por lo que se aconseja el empleo de este material en edificaciones con grandes cargas.

En cambio, la **resistencia a compresión**:

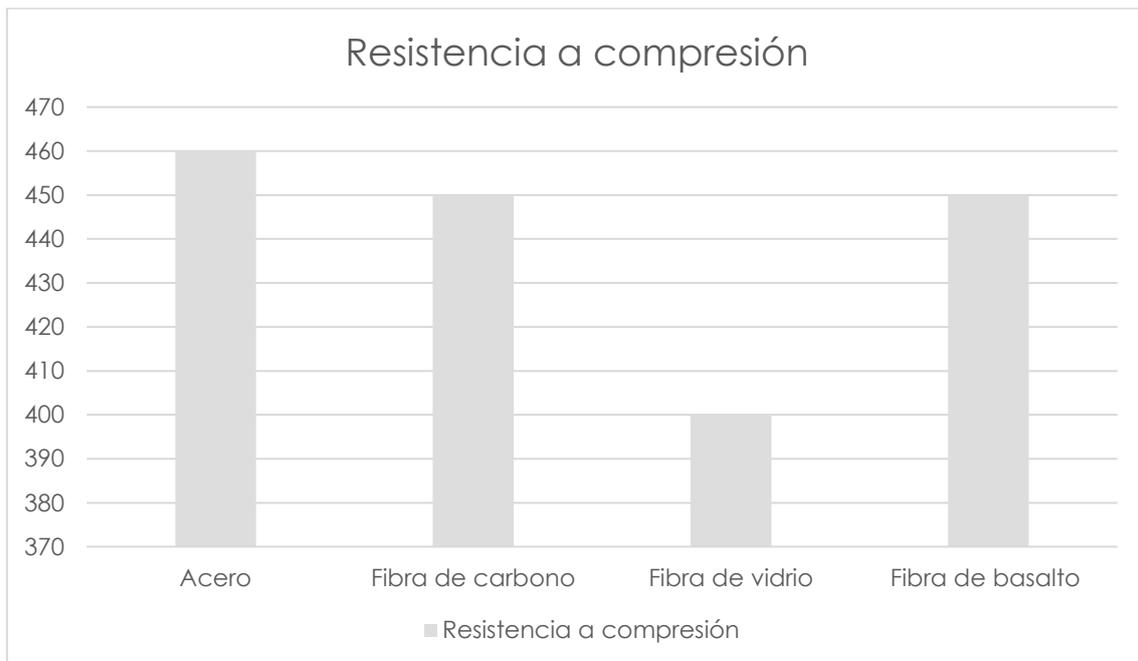


Fig. 4.4. Comparación resistencia a compresión.

- La resistencia a compresión del acero, al igual que el resto de materiales, es mucho menor que su resistencia a tracción, siendo la máxima de 460 MP
- La fibra de carbono a compresión resiste hasta 450 MPa.
- La resistencia de la fibra de vidrio es de 400 MPa.
- La fibra de basalto llega a soportar hasta 450 MPa.

Se percibe una mayor resistencia a compresión de las barras de acero, aunque no mucho mayor que las demás barras, pero no se aconseja emplear ninguna de estas barras para resistir las cargas de compresión, sino que es el hormigón el encargado de soportar estas tensiones.

Por otro lado, la **adherencia**:

- La adherencia acero- hormigón se produce tanto por acciones físicas como por rozamiento gracias a las corrugas de las barras de acero, siendo la tensión adherente máxima de 12,74 MPa en barras de 19 mm de diámetro.
- En las barras de fibra de carbono la adherencia depende del tipo de barras, siendo las arenadas son las que mejor adherencia poseen, siendo esta adherencia de 12 MPa.
- En cuanto a la adherencia GFRP-hormigón, la adherencia depende del acabado superficial de la barra, siendo las corrugadas las que mayor adherencia presentan. Las barras corrugadas de 10 mm de diámetro presentan una adherencia de 7,7 MPa.
- Las barras de fibra de basalto también presentan una buena adherencia con el hormigón gracias a su superficie helicoidal. La resistencia adherente de una barra de BFRP de 10 mm de diámetro es de 10 MPa.

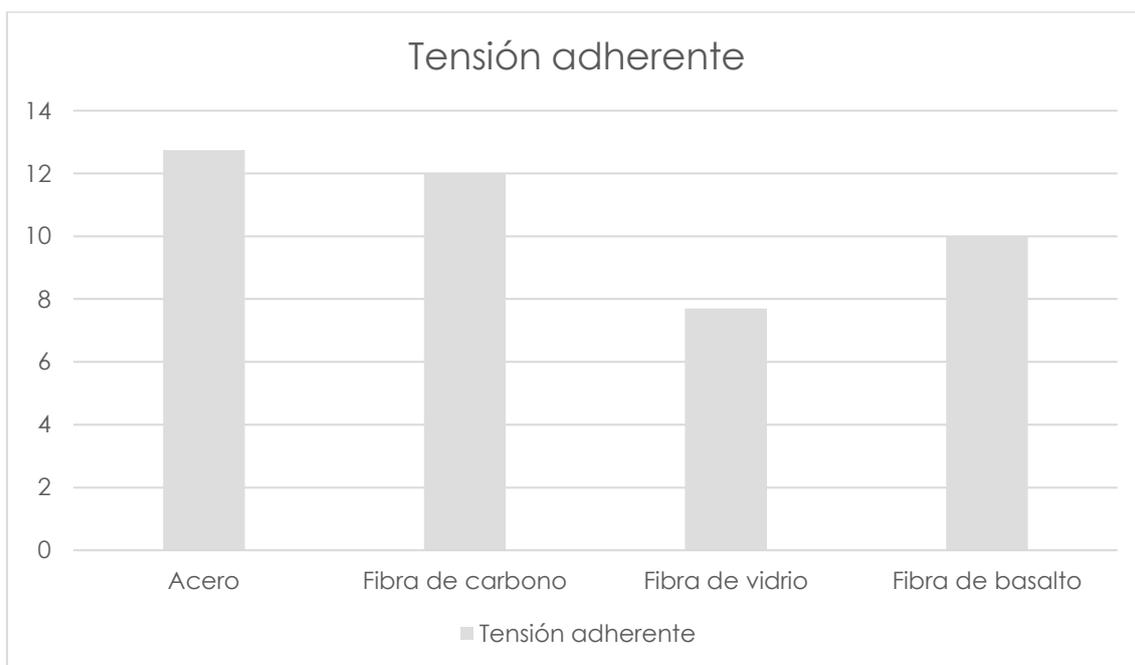


Fig. 4.5. Comparación adherencia con el hormigón.

Todos los materiales buscan una tensión adherente similar a la del acero, ya que como se muestra es el material con mayor adherencia. El material que más se aproxima es la fibra de carbono, la cual presenta muy poca diferencia respecto a la resistencia del acero. La fibra de vidrio es el que peor comportamiento tiene en este aspecto, mientras que la fibra de basalto se consideraría aceptable.

Por último, el **precio**:

- El acero tiene un coste de 0,81 €/Kg, el cual es muy bajo respecto al resto de los materiales estudiados.
- Por el contrario, la fibra de carbono tiene un precio de 16 €/Kg, el más elevado.
- La fibra de vidrio tiene un coste intermedio, de 5€/Kg.
- Mientras que la fibra de basalto tiene el segundo precio más bajo, siendo este de 3€/Kg.

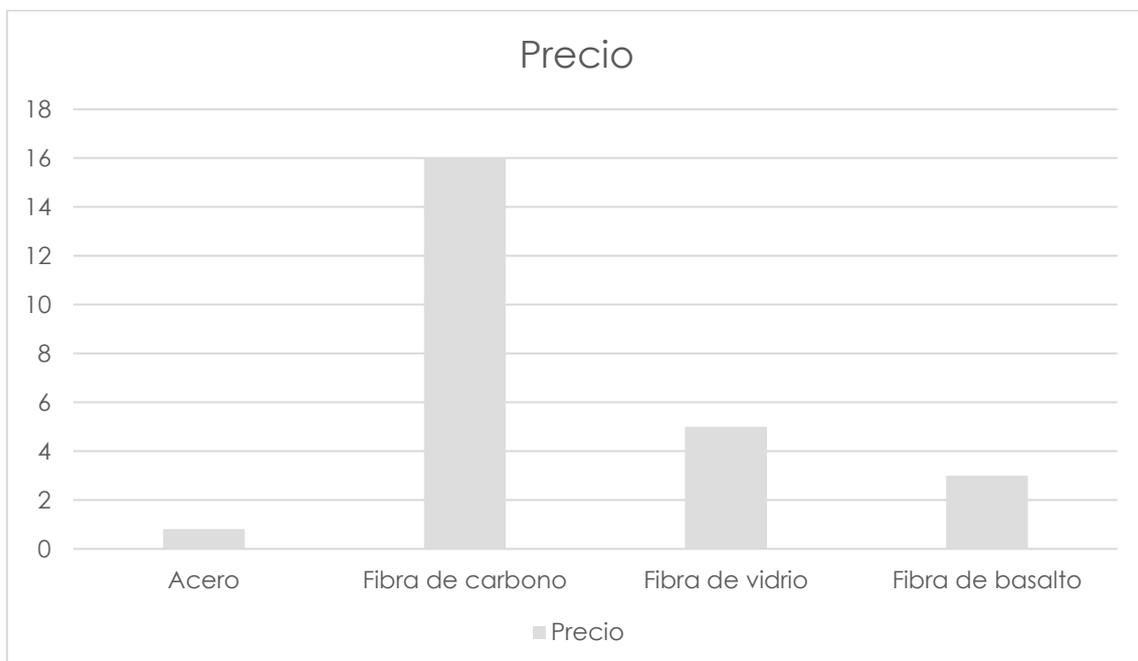


Fig. 4.6. Comparación precios.

Por lo que se muestra se puede pensar que la opción más económica son las barras de acero, pero analizando los aspectos anteriores, el acero es el que menor resistencia presenta, por lo que se necesita un mayor número de barras con grosores mayores. Por otra parte, el precio se muestra por Kg, y puesto que el peso del acero es mucho mayor que el de los demás materiales, su coste será mucho más elevado. Además, debido a su elevado peso, se necesitará maquinaria pesada para su transporte, a diferencia de los otros materiales. Otro factor que influye en el coste de las estructuras es el mantenimiento a largo plazo, donde tiene un gran peso la corrosión, y puesto que el acero no tiene resistencia a la corrosión, su mantenimiento será más elevado.

Por todo esto, se demuestra que las barras más favorables para las estructuras de hormigón armado son las de CFRP y las de BFRP. A continuación, se procede a comparar ambas barras con el fin de demostrar cuál de ellas es la mejor opción, tanto por sus propiedades como por su precio:

- La densidad de las barras de BFRP en comparación con la del CFRP es prácticamente despreciable, siendo la de la fibra de basalto de $0,3 \text{ g/cm}^3$ mayor que la fibra de carbono.
- La diferencia de dilatación térmica entre ambos materiales es despreciable.
- La fibra de basalto es un material con conductividad térmica nula, a diferencia que el CFRP.
- Ambos materiales son anticorrosivos, por lo que garantizan que no será necesario un posterior mantenimiento por corrosión.
- En cuanto a la resistencia mecánica, el CFRP presenta una mucho más elevada resistencia a tracción, de unas 3 veces más que el BFRP, mientras que la resistencia a compresión de ambas barras es la misma, aunque el comportamiento del armado en compresión no es realmente importante, ya que el hormigón es el encargado de asumir estos esfuerzos.
- La adherencia de las barras de CFRP es la que más se asemeja al acero, aunque su tensión adherente no es mucho mayor que la del BFRP (2 MPa menor).
- Por último, el precio de la fibra de basalto es mucho más bajo que el de la fibra de carbono, unas 5 veces menor.

Analizando estas comparaciones, se concluye que, puesto que ambos son materiales muy ligeros, con prácticamente las mismas propiedades, aunque las barras de CFRP presenten una resistencia a tracción 3 veces mayor que las barras de BFRP, puesto que el precio de la fibra de carbono es 5 veces mayor que el de la fibra de basalto, la mejor solución respecto a comportamiento-precio es la de las barras de BFRP. Por ello, se aconseja el empleo de las barras de BFRP en la estructura de edificaciones menores, en las que las cargas pueden ser soportadas fácilmente por las barras de BFRP, así como en las zonas donde la estructura se pueda corroer fácilmente, ya que estas barras son anticorrosivas, y se reducirá en gran medida el posterior mantenimiento. En cambio, cuando se trata de edificaciones con cargas elevadas, las barras de CFRP son la mejor opción.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES PRINCIPALES

Tras el análisis realizado anteriormente, las principales conclusiones que se pueden obtener del estudio son:

- I. Se demuestra que el armado más ligero, con una densidad de $1,6 \text{ g/cm}^3$, es el de CFRP, aunque no existe una gran diferencia con el BFRP ($1,9 \text{ g/cm}^3$).
- II. Las barras de FRP presentan diferentes comportamientos dependiendo de la dirección de la barra, ya que en una dirección es la fibra el material que predomina y en otra es la resina. En la dirección transversal, es el acero el que mejor comportamiento tiene frente a la expansión térmica, aunque la dirección más importante en las barras, al ser longitudinales, es la dirección longitudinal, donde es el CFRP el material que mejor comportamiento presenta, aunque la dilatación térmica de estos materiales es prácticamente nula, por lo que no influye en cuanto al comportamiento resistente de la estructura.
- III. Las barras de GFRP y de BFRP tienen una conductividad eléctrica nula, a diferencia del acero y del CFRP, los cuales necesitan un acabado superficial o ser revestidos por algún material con el fin de evitar la propagación de electricidad a través de la barra.
- IV. Si se desea edificar en zonas de ambiente salino, las barras de CFRP y de BFRP son las más adecuadas, ya que son materiales anticorrosivos, lo que, además, garantiza que su mantenimiento a largo plazo será mucho menos costoso que en el resto de los materiales estudiados.
- V. El CFRP presenta una resistencia a tracción de hasta 3690 MPa , siendo esta mucho más elevada que la resistencia de los demás materiales. En cambio, el acero es el material que mejor resiste la compresión, aunque no se diferencia mucho de los otros armados.
- VI. Las barras de FRP tienen un modo de rotura frágil debido a que no tienen límite elástico ni plástico, por lo que su comportamiento es lineal hasta llegar a la rotura, en cambio el acero tiene un modo de rotura dúctil, ya que tiene un comportamiento elástico y plástico, con límite elástico y plástico.
- VII. La adherencia con el hormigón depende en gran medida de la superficie de la barra, ya que la tensión adherente se produce por rozamiento, a excepción de las barras de acero, las cuales presentan inicialmente una adherencia por acciones físicas.

- VIII. El acero corrugado, gracias a las corrugas de su superficie es el material que mejor adherencia barra-hormigón posee, aunque la diferencia de tensión adherente con las barras de CFRP arenadas y de BFRP es prácticamente despreciable.
- IX. Las barras que menor precio tienen son las de acero, siendo este de 0,81 €/Kg, y las más caras son las de CFRP, con un precio de 16 €/Kg, siendo las más favorables respecto a peso-precio las de basalto, con un precio de 3€/Kg.
- X. Cuanta mayor resistencia tenga un material, menor grosor y cantidad de barras se necesitará para una misma estructura.
- XI. Las barras más favorables para el armado de una estructura de hormigón armado son las de CFRP y las de BFRP, puesto que son las que mejores características presentan.
- XII. Se concluye que, aunque las barras de CFRP presenten una resistencia a tracción unas 3 veces mayor que las barras de BFRP, puesto que el precio de la fibra de basalto es 5 veces menor que la fibra de carbono, y ambos son prácticamente igual de ligeros, la mejor opción en cuanto a comportamiento-precio es el empleo de barras de BFRP como armado de las estructuras de hormigón armado, aconsejándose su uso en edificaciones con cargas fácilmente soportables por las barras de BFRP y en las ubicadas en ambientes salinos en las que puede aparecer corrosión en las armaduras. En cambio, se recomienda el uso de barras de CFRP en aquellas edificaciones en las que las cargas a soportar sean muy elevadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. 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_2015_Hormig%C3%B3n.pdf
2. "Hormigones". Ingeniería de edificación. De:
<http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/materiales-ii/contenidos/HORMIGON%20IE.pdf>
3. "Proyecto de urbanización de vial y puente del ámbito α-8-7.7". Pliego de prescripciones técnicas particulares, capítulo II, artículo 202.
4. 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
5. M. Meseguer Morán, G. Gili, 2000. "Hormigón armado". Ingeniería rural. Barcelona.
6. 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>.
7. Revista ARQHYS. 2012, 12. Acero y construccion. Equipo de colaboradores y profesionales de la revista ARQHYS.com. Obtenido 08, 2019, de <https://www.arqhys.com/arquitectura/acero-construccion.html>.
8. 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>.
9. J. M. García Polo, 2013. "Estructuras de hormigón pretensado armadas con FRP (Fibers Reinforcement Polymers)". Universidad Politécnica de Valencia.
10. 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.
11. Fib bulletin 40, 2017. "FBR Reinforcement in RC Structures". Technical Report.
12. 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.
13. C. E. da Costa, F. Velasco López, J. M. Torralba Castelló. "Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones". Revista metalurgia.

14. A. 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.
15. Blog "Tecnología de los plásticos", 2011. "Poliéter éter cetona (PEEK)" de: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/polieter-eter-cetona-peek.html>
16. 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.
17. F. A. Herrera Castañeda. "Ciencia de los polímeros".
18. A. Gil, 2012. "Resinas de poliéster, guía de manejo". EAFIT.
19. "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>
20. "Fibra de vidrio". De: <http://www.cursos.maximatec.com/downloads/Fibra%20de%20Vidrio.pdf>
21. H. V. S. GangaRao, N. Taly, P. V. Vijay, 2006. "Reinforced concrete design with FRP composites". CRC Press, Taylor & Francis Group.
22. L. Colin, 1956. "Composites for construction: structural design with FRP materials". Wiley, John Wiley & Sons, INC.
23. J. Torres Vegara, 2018. "Estudio comparativo de barras corrugadas de diferentes materiales para armar hormigón". Universidad Politécnica de Valencia.
24. J. Poveda Bernal, 2012. "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte". Universidad de Valladolid.
25. A. I. Almerich Chulia, 2010. "Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP". Universidad Politécnica de Valencia.
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. P. Valles Pla, 2013. "Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación". Universidad Politécnica de Valencia.

28. L. A. Caro Forero, 2012. "*Comportamiento adherente diferido de armaduras pretensadas en hormigón*". Universidad Politécnica de Valencia
29. 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.
30. 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.
31. Clark, A.P., 1946. "Comparative Bond Efficiency of Deformed Concrete Reinforcing Bars", ACI Journal Proceedings V.43, nº 4, pp 381-400.
32. Diederichs U., Schneider U., 1981. "Bond strength at high temperatures", Magazine of Concrete Research, V. 33, nº 115, pp. 75–84.
33. 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.
34. H. Sarrión Sos, 2018. "*Propiedades y aplicaciones de los polímeros sintéticos en la construcción*". Universidad Politécnica de Valencia.
35. 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.
36. J. M. Escacena Ventura. "*Caracterización de las propiedades mecánicas del aluminio 7075-T651*".
37. I. Montava Belda. "*Estudio del comportamiento de estructuras de hormigón armado con perfiles metálicos completamente embebidos*". Universidad de Alicante. Escuela politécnica superior.
38. B. Segura Plaza, 2016. "*Resistencia estructural: madera, hormigón y acero*". De: <https://www.maderea.es/resistencia-estructural-madera-hormigon-acero/>
39. "*Acero material estructural*", 2015. De Blogspot: <http://aceromaterialestructural.blogspot.com/2015/03/efectos-de-la-temperatura-en-el-acero.html>
40. L. 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.

41. B. Parkyn, 1985. "Glass reinforced plastics". Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, 2nd Ed.
42. R. 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.
43. Y. Wang, P. Wong, 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.
44. E. Cosenza, G. Manfredi, R. Realfonzo, 1997. "Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete". Jour. Compo. Constr. Vol. 1.
45. Z. Achillides, K. Pilakoutas, 2004. "Bond behaviour of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions". ASCE J. Compos. Constr.
46. M. Baena, L. Torres, A. Turon, C. Barris, 2009. "Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test". Composites.
47. A. 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.
48. FIB, 2000. "Bond of reinforcement in concrete, State-of-art Report, Bulletin 10". Fib-International Federation for Concrete Task Group Bond Models.
49. Y. Kato, T. Nishimura, T. Uomoto, T. Yamaguchi, 1998. "The effect of ultraviolet rays to FRP rods". Proc. CDCC '98.
50. A. Machida, 1993. "State-of-the-art report on continuous fiber reinforcing materials". Concrete Engineering Series 3. Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials.
51. R. E. Allred, 1984. "The effects of temperature and moisture content on the flexural response of Kevlar/epoxy laminates". Environmental Effects on Composites Materials.
52. H. 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-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures.
53. E. Cosenza, G. Manfredi, R. Realfonzo, 1997. "Behaviour and modeling of bond of FRP rebars to concrete". Journal Composites Construction.

54. 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.
55. G. Marshall, 1949. "*End anchorage and bond stress in prestressed concrete*". Magazine of Concrete Research.
56. T. E. Cousins, J. M. Stallings, M. B. Simmons, 1994. "*Reduced Strand Spacing in Pretensiones, Prestressed Members*". ACI Structural Journal.
57. P. 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*".

BIBLIOGRAFÍA TABLAS

Tabla 1.1. “Proyecto de urbanización de vial y puente del ámbito α -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. Elaboración propia.

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. ICP ECO II, Fibra de basalto, de: [https://juntec.es/pdf/113_11610_TDS-\[ICP%20ECO%20II%20BASALTO%20ES\].pdf](https://juntec.es/pdf/113_11610_TDS-[ICP%20ECO%20II%20BASALTO%20ES].pdf)

Tabla 2.1. Adaptación de Fib bulletin 40, 2017. “FBR Reinforcement in RC Structures”. Technical Report y P. Valles Pla, 2013. “Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación”. Universidad Politécnica de Valencia.

Tabla 2.2. Adaptación de Fib bulletin 40, 2017. “FBR Reinforcement in RC Structures”. Technical Report.

Tabla 2.3. Adaptación de H. V. S. GangaRao, N. Taly, P. V. Vijay, 2006. “Reinforced concrete design with FRP composites”. CRC Press, Taylor & Francis Group.

Tabla 2.4. 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 2.5. 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 2.6. 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 3.1. Elaboración propia.

Tabla 3.2. Elaboración propia.

Tabla 3.3. Elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA 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”. Cienciamx.

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. S. Bhattacharya, S. Patil, L. Chaudhari, S. Swain, R. A. Sharma, V. Chaudhary, 2012. “Synthesis of vinyl ester and it blending with upr to prepare electrically insulating composite with improved mechanical properties”. Blog Semantic Scholar.

Figura 1.10. “Fibras sintéticas y especiales”, 2013. Blog Blogspot.

Figura 1.11. “El vidrio... ¿Es un Polímero?”. Departamento de ciencia de polímeros. Universidad del sur de Mississippi, de: <https://pslc.ws/spanish/glass.htm>.

Figura 1.12. Página web: <https://haisan.en.made-in-china.com/product/oKSmvBlxXPpH/China-Basalt-Material-Basalt-Fiber-Rebar.html>.

Figura 2.1. Fib bulletin 40, 2017. “FBR Reinforcement in RC Structures”. Technical Report.

Figura 2.2. 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.

Figura 2.3. J. M. Escacena Ventura. “Caracterización de las propiedades mecánicas del aluminio 7075-T651”.

Figura 2.4. 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 2.5. 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. Adaptado de achillides et al. 2004.

Figura 2.6. 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. Adaptado de Peters 1998.

Figura 2.7. 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. Adaptado de Gdoutus et al. 2000.

Figura 2.8. P. Valles Pla, 2013. *"Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación"*. Universidad Politécnica de Valencia.

Figura 2.9. 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. Adaptado de Peters 1998.

Figura 2.10. 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. Adaptado de Yuan et al. 2001.

Figura 2.11. A. I. Almerich Chulia, 2010. *"Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP"*. Universidad Politécnica de Valencia.

Figura 2.12. Fib bulletin 40, 2017. *"FBR Reinforcement in RC Structures"*. Technical Report.

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. 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 2.15. 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. M. C. Delgado Bueno, 2008. “Modelización numérica del comportamiento adherente acero-hormigón en presencia de compresión transversal”.

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. “Armaduras-Hormigón: Características de adherencia”, 2012. Blog constructor civil.

Figura 2.19. 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.

Figura 2.20. 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 2.21. E. Cosenza, G. Manfredi, R. Realfonzo, 1997. “Behaviour and modelinf od bond of FRP rebars to concrete”. Journal Composites Construction.

Figura 2.22. 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 2.23. Z. Achillides, K. Pilakoutas, 2004. “Bond behaviour of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions”. ASCE J. Composer. Constr.

Figura 4.1. Elaboración propia.

Figura 4.2. Elaboración propia.

Figura 4.3. Elaboración propia.

Figura 4.4. Elaboración propia.

Figura 4.5. Elaboración propia.

Figura 4.6. Elaboración propia.