
Estudio comparativo entre barras corrugadas de acero y de basalto para su uso en edificación

12 sep. 14

AUTOR:

PAULA VALLES PLA

TUTOR ACADÉMICO:

Montse Haro Rodríguez [Construcciones Arquitectónicas]



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR
ENGINYERIA
D'EDIFICACIÓ

Motivación

El interés que mostró mi tutora de proyecto en dicho tema, me transmitió la primera y principal motivación de investigar sobre él.

Me dio buenas vibraciones desde el principio, ya que iba a conocer propiedades de un material que iba a superar al actual acero en el ámbito de la construcción.

A raíz de saber el tema a tratar, investigué y encontré una cita de Raw EnergyTech LLC (RAW) en uno de sus artículos¹, donde me surgió otra motivación para mi presente estudio, y es que planteaba la preocupación que existe por la dependencia de los recursos no renovables y la crisis económica que existe hoy en día en el mundo.

Decía que a partir de dicha preocupación, surgió la necesidad de crear nuevos productos "verdes", es decir, aquellos que no perjudican al medio ambiente, y las tecnologías y productos sean económicamente viables.

También me interesé por el presente tema a raíz de tratar más a fondo el problema que está surgiendo día a día. Después de tantos años de construcción pesada, se deben invertir miles de millones de euros para la sustitución o reparación de la infraestructura actual, a causa de las lesiones que están surgiendo a raíz de varias propiedades indeseables del acero.

¹ Don R.Smith (26/04/2009) artículo de sobre "RockRebar tm". Raw Energy Materials Corp. Se puede acceder online a través del siguiente link: (http://newrebar.com/informacion_en_espa%C3%B1ol) visitado el 04/03/14

Objetivo

El objetivo de nuestro proyecto es el estudio sobre las propiedades mecánicas del basalto, como material novedoso en barras corrugadas en el ámbito de la edificación, y el acero, como material actual en dicho ámbito.

Este estudio se realizará mediante el análisis de los ensayos correspondientes, proporcionados por empresas y otras investigaciones y tesis.

Una vez obtenidas sus propiedades también se resolverá el montaje de ambas barras en un elemento estructural, calculando los costes de cada material, según el diámetro y número de barras a utilizar, para con ello poder obtener la comparativa de los materiales citados anteriormente.

Metodología

Inicialmente conoceremos las propiedades y características de cada uno de los materiales que en el siguiente proyecto vamos a analizar.

A continuación se analizarán los ensayos previos, que sirven para definir las longitudes mínimas y el material adecuado para los anclajes de las barras de BFRP empleados en el ensayo de tracción y pull-out.

Se analizarán unos ensayos experimentales anteriores a realizar los ensayos principales. Estos se han dividido en dos etapas:

- La primera etapa consta de los **ensayos preliminares**, mediante los cuales siguiendo las normativas ACI² y ASTM³, se realizan ensayos de diámetro equivalente, estudio de la geometría superficial, y ensayos de tracción longitudinal, calculando así, las características geométricas, resistencia a tracción, módulo elástico y alargamiento de las barras de BFRP.
- La siguiente etapa y principal consta de los **ensayos de pull-out**, mediante los que se calcula el comportamiento adherente entre las barras de BFRP y el hormigón.

² Páginas de consulta online sobre normas ACI:

http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_318-05_Espanhol.pdf

<http://www.radyab.co/content/media/article/13.pdf>

http://www.radyab.co/content/media/article/4403R_04_0.pdf

³ Página de consulta online sobre normas ASTM

(<http://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=ACi&>)

En los ensayos experimentales, también se consideran ensayos de pull-out de comparación con barras de acero, con el fin de obtener una comparativa del comportamiento adherente entre las barras de BFRP y barras de acero.

Y por último, una vez obtenidos los datos se hará una pequeña comparación entre barras de acero y basalto, tanto por propiedades mecánicas como por el precio de la puesta en obra de dichas barras en un mismo elemento estructural, una viga.

Organización del proyecto

El presente estudio se divide en cinco capítulos.

En el **Capítulo 1** se presentan los antecedentes que nos han dado lugar a investigar y utilizar este tipo de material BFRP, es decir, la corrosión en las armaduras, en especial la corrosión marina, que es la que se ha estudiado principalmente en el siguiente proyecto.

Se estudian los efectos de dicha lesión, tanto en seguridad como económicamente, el marco legal y por último las propuestas de materiales para evitar la corrosión en las armaduras, en lo que se hace referencia al material que se está utilizando hoy en día (acero) en el ámbito de la construcción y el material con el que se quiere innovar en el dicho ámbito, el basalto.

En el **Capítulo 2** se presenta una pequeña introducción y antecedentes del material que se estudia, pero ya como barras de FRP, también se desarrolla su proceso de fabricación, propiedades mecánicas, físicas y durabilidad de las barras de basalto frente a otros tipos de barras y el comportamiento adherente entre las barras de BFRP y el hormigón.

En el **Capítulo 3** se define el material empleado y el programa experimental que se va analizar de forma detallada, y mediante el cual se obtendrán los resultados que en el capítulo siguiente se comentarán.

En el **Capítulo 4** se desarrolla el análisis de los resultados obtenidos anteriormente en cuanto a propiedades mecánicas, y posteriormente se realizara una pequeña comparación en cuanto a precios, mediante la realización de un elemento estructural (una viga)

con barras corrugadas de acero y el mismo elemento realizado con barras de fibra de basalto.

Y por último en el **capítulo 5** se enumeran las conclusiones y futuras líneas de investigación del presente estudio.

Resumen

Debido a los problemas de corrosión que han habido en estructuras de hormigón armadas con acero, y sometidas a ambientes agresivos, se ha realizado el siguiente análisis de el porqué el uso de barras de materiales compuestos FRP en sustitución de las barras corrugadas de acero.

En este trabajo se va a estudiar el comportamiento de las barras corrugadas de acero y basalto para construcción, mediante un estudio de las propiedades mecánicas obtenidas a través de los ensayos de laboratorios externos.

He analizado que las estructuras de hormigón armadas con barras FRP se comportan de manera diferente a los elementos armados con acero, debido a su menor módulo de elasticidad, a la ausencia de límite elástico y ausencia de corrosión.

Uno de los aspectos básicos del comportamiento estructural es la adherencia, ya que la transmisión correcta de cargas del refuerzo al hormigón depende de ella, como también la calidad de la adherencia influye sobre la fisuración.

Contemplaremos que hay diferentes variables implicadas en el comportamiento adherente, como: el diámetro de la barra, el tipo de fibra o material, el acabado superficial y la resistencia del hormigón.

Una vez obtenidas sus propiedades se resolverá el montaje de ambas barras en un mismo elemento estructural, calculando los costes de la puesta en obra, para poder obtener la comparativa de los citados materiales.

Palabras clave: FRP, BFRP, Barras corrugadas de basalto, Barras de refuerzo de basalto, barras de refuerzo de fibra de basalto.

Resum

A causa dels problemes de corrosió que han hagut en estructures de formigó armades amb acer, i sotmeses a ambients agressius, s'ha realitzat el següent anàlisi del perquè l'ús de barres de materials compostos FRP en substitució de les barres corrugades d'acer.

En aquest treball es va a estudiar el comportament de les barres corrugades d'acer i basalt per a construcció, mitjançant un estudi de les propietats mecàniques obtingudes a través dels assaigs de laboratoris externs.

He analitzat que les estructures de formigó armades amb barres FRP es comporten de manera diferent als elements armats amb acer, per el seu menor mòdul d'elasticitat, a l'absència de límit elàstic i absència de corrosió.

Un dels aspectes bàsics del comportament estructural és l'adherència, ja que la transmissió correcta de càrregues del reforç al formigó depèn d'ella, com també la qualitat de l'adherència influeix sobre la fissuració.

Contemplarem que hi ha diferents variables implicades en el comportament adherent, com: el diàmetre de la barra, el tipus de fibra o material, l'acabat superficial i la resistència del formigó.

Una vegada obtingudes les seves propietats es resoldrà el muntatge de les dues barres en un mateix element estructural, calculant els costos de la posada en obra, per poder obtenir la comparativa dels materials nomenats.

Paraules clau: FRP "Fiber Reinforced Polymer", BFRP, Acer, Barres corrugades, Innovació, Barres de reforç de basalt, barres de reforç de fibra de basalt.

Abstract

In consequence of corrosion problems which have been in steel reinforced concrete structures when they are exposed to harsh environments has been made the following analysis of replacing FRP composite rods by corrugated steel bars.

This project studies the performance of deformed steel bars and basalt for construction, through a study of the mechanical properties obtained through tests at external laboratories.

It is proved that the performance of concrete structures armed with FRP bars differs from the way they perform armed with steel elements. This is because of its lower modulus of elasticity, the lack of yield point and the absence of corrosion.

One of the basic aspects of the structural behavior is adherence, since the proper transmission of loads to the concrete reinforcement depends on it, as the quality of adhesion influences cracking.

The diameter of the bar or the type of fiber material, the surface finish and strength of the concrete; the different variables involved in the bonding behavior are contemplated.

After obtaining the assembly properties of both bars in the same structural element, it is calculated the costs of use in construction in order to compare both materials.

Keywords: FRP "Fiber Reinforced Polymer", BFRP, Steel, Corrugated bars, Innovation, Rebar basalt bars, BFRP rebar bars, Basalt fiber rod.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia la continua motivación, apoyo y confianza en mí, al igual que el aporte económico de mis padres a lo largo de toda la carrera, ya que sin ellos no hubiera llegado donde estoy.

No hay día que no me hayan motivado a seguir adelante, a conseguir esa meta que desde pequeña quería, de ser capaz de hacer una casa, y aquí estoy presentando un proyecto que demuestra mis saberes a lo largo de la carrera.

A mis compañeros/as que han sido capaces de soportar mis momentos más extremos de histeria y estrés, que pensaba que no tenían ningún fin este último año, en especial a Garrido Abalos, Laura y Gimenez Esquer, M^aCarmen.

Sin duda alguna, he extrañado esos tiempos de mi vida en que resolver una duda sobre una palabra, era tan sencillo como abrir el diccionario y buscar solución. Recuerdo la maravillosa sensación que tuve cuando aprendí, en primaria, a usar ese útil libro: sentía que tenía a todo el mundo en la punta de mis dedos. En esa época creía que podía aprender y entender todo simplemente buscándolo en un diccionario o una enciclopedia, y esa sensación me encantaba.

Pero nada más emprender este proyecto vi que todo tenía miles de sentidos y soluciones posibles, y que buscabas en mil sitios y no encontrabas la respuesta tan clara como en un diccionario, y es ahí cuando venía el agobio, y el porqué de todo.

Es por eso que quiero agradecer a todas aquellos familiares, compañeros/as y profesores que han tenido la delicadeza de explicarme palabras, ensayos, cálculos, etc. que no llegaba a entender.

Agradecer también a la tutora de la tesis, Dña. Montse Haro Rodríguez y a mi cotutor Dr. Luis Vicente García Ballester por su continua motivación y tutela. Su experiencia, consejos y contribuciones han hecho posible la realización de este proyecto.

Y para finalizar agradecer también a los profesores Vicente Monzo Hurtado y José Ramón Albiol Ibañez, que no siendo ni tutores ni co-tutores me han prestado su ayuda, prestándome información en la realización de algunas partes de mi proyecto, al igual que motivación y interés en mi persona y mi proyecto. Como también los técnicos del laboratorio de materiales, Jesús y Rafa, que han intentado ayudarme y explicarme cuando no tenía rumbo alguno.

Acrónimos utilizados

BFRP : Tensile Strength of Basalt Fiber Reinforced Plastic

BIM: Building Information Modeling

CAD: Computer Aided Design / Diseño Asistido por Ordenador

CTE: Código Técnico de la Edificación

FRP: Fiber Reinforced Polymer

ACI: American Concrete Institute

ASTM: American Society for Testing and Materials

LOE: Ley Orgánica de Educación

EHE: Instrucción de Hormigón Estructural

Fe: Hierro

O: Oxígeno

H: Hidrógeno

e: Electrones

Cl: Cloro

C₃A:

PIB: Producto interno bruto

V_{dt1}: Esfuerzo cortante de cálculo en el borde del apoyo.

V_{u1} : Esfuerzo cortante de apotamiento por compresión oblicua del hormigón en el alma.

b_0 : Menor ancho de la sección en una altura igual a $3/4$ del canto útil, contados a partir de la armadura de tracción.

V_{d2} : Esfuerzo cortante de cálculo a una distancia de un canto útil del borde del apoyo.

V_{u2} : Esfuerzo cortante de apotamiento por tracción en el alma.

V_{cu} : Cortante que absorbe el hormigón.

V_{su} : Cortante que absorbe el estribo.

f_{cv} : Resistencia virtual del hormigón en N/mm^2 .

d : Canto útil en mm.

ρ_1 : Cuantía geométrica de la armadura longitudinal traccionada.

A_{s1} : Armadura de tracción.

A_α : Armadura transversal necesaria

$f_{yud} = F_{yd}$: pero tomando como máximo un valor de 40 kN/cm^2 (cuando el acero sea B500S)

n : nº de ramas (habitualmente $n=2$ a no ser que los estribos estén separados transversalmente más de un canto útil o 50 cm)

A_\emptyset : Área del estribo

S_t : Separación entre estribos

A_{s2} : Armadura de compresión.

Índice

Motivación.....	1
Objetivo	2
Metodología	3
Organización del proyecto.....	5
Resumen	7
Resum	8
Abstract	9
Agradecimientos.....	10
Acrónimos utilizados	12
Índice	14
Capítulo 1. Introducción	17
1 Corrosión	17
1.1 Concepto y tipos de ambientes	17
1.2 Corrosión en ambiente marino	19
2 Evaluación de los efectos de la corrosión.....	31
2.1 En cuanto a seguridad	31
2.2 Pérdidas económicas	32
3 Marco legal	41

3.1	Aspectos normativos	41
3.2	Código Técnico de la Edificación (CTE)	43
3.3	Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)	46
4	Propuestas para evitar la corrosión.....	51
4.1	Acero.....	52
4.2	Basalto	70
Capítulo 2. Revisión Bibliográfica del Basalto.....		80
1	Introducción	80
2	Fabricación.....	88
3	Interface fibra - matriz.....	94
4	Propiedades físicas, mecánicas y durabilidad de las barras	101
5	Adherencia entre hormigón - BFRP	111
Capítulo 3. Programa experimental y Resultados		113
1	Introducción	113
2	Material empleado	114
2.1	Barras de basalto	114
2.2	Barras de acero	115
3	Ensayos previos	116
3.1	Cálculo de la longitud mínima de los anclajes.....	116
4	Ensayos experimentales	121
4.1	Ensayos preliminares	121
4.2	Ensayos pull-out	129

Capítulo 4. Análisis de los resultados y discusión.....	144
5 En cuanto a propiedades	144
6 Propuesta para la comparativa entre barras corrugas de acero y barras de fibras de basalto.	148
7 En cuanto a precios	149
Capítulo 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación	160
1 Conclusiones.....	160
2 Futuras líneas de investigación.....	162
Capítulo 6. Referencias Bibliográficas	164
Capítulo 7. Índice de Figuras	168
Índice de Tablas	171

Capítulo 1.

Introducción

1 Corrosión

1.1 Concepto y tipos de ambientes

La corrosión⁴, es un proceso natural de deterioro de un metal por su tendencia a buscar el equilibrio electroquímico al entrar en contacto con su medio ambiente. Es una de las lesiones más comunes hoy en día en la mayoría de las infraestructuras, como comentaré posteriormente.

Generalmente se pueden encontrar en la naturaleza todos los metales, exceptuando los metales nobles, en forma de compuestos (óxidos, hidróxidos, sulfatos, etc.), estado que pertenece a valores reducidos de la energía de Gibbs. Debido a esto, es necesario un aporte energético para la extracción de los elementos metálicos, a partir de los compuestos anteriormente nombrados, que se llevará a cabo a través de un proceso de reducción.

Los metales de forma natural tenderán a regresar a estados de inferior nivel energético, ya que es cuando son estables, y esto es lo que

⁴ Libro de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado, ECU editorial club universitario , autores : Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

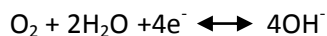
sucede en los procesos de corrosión, donde la oxidación de los elementos metálicos implica una transformación del metal a diferentes compuestos, con una energía menor. Por eso, cuanta más energía se necesite para obtener un metal, con mayor facilidad se producirá su corrosión.

La corrosión puede desarrollarse según dos mecanismos diferentes:

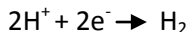
- Oxidación **directa** (o corrosión seca), que sucede cuando el metal soporta una temperatura elevada, en ausencia de agua.
- Corrosión por intervención de una solución **acuosa** (corrosión húmeda), que es la más usual.

Podemos distinguir varios tipos de ambientes o clases de exposición como se muestra en la Figura 1, pero nosotros nos vamos a centrar en la corrosión en **ambiente marino**, es decir, aquella que aparece por intervención de una solución acuosa. En este caso, el mecanismo que se crea incluye reacciones químicas diferentes, con unas zonas de disolución del metal (zonas anódicas) y otras en que se permanece inalterado (zonas catódicas), generándose así una pila cuyo continuado funcionamiento solicita que exista un circuito eléctrico cerrado que incluye el ánodo, el cátodo, la conexión metálica entre ambos y el propio electrolito.

Por ello, a este mecanismo se le nombra como **corrosión electroquímica**. Las reacciones son:



En medio ácido, son los iones hidrógeno los que reaccionan con los electrones liberados en vez del oxígeno disuelto :



La cantidad, en peso, de metal que se corroe es proporcional a la intensidad "I" de la corriente que se produce (en amperios) y al tiempo "t" transcurrido (en segundos), por medio de la ley de Faraday:

$$\text{Número de equivalentes - gramos} = \frac{I * t}{96493}$$

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
no agresiva		I	ninguno	-interiores de edificios, no sometidos a condensaciones -elementos de hormigón en masa	-interiores de edificios, protegidos de la intemperie
normal	Humedad alta	Ila	corrosión de origen diferente de los cloruros	-interiores sometidos a humedades relativas medias altas (>65%) o a condensaciones -exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm -elementos enterrados o sumergidos.	-sótanos no ventilados -cimentaciones -tableros y pilas de puentes en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm -elementos de hormigón en cubiertas de edificios
	humedad media	Ilb	corrosión de origen diferente de los cloruros	-exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm	-construcciones exteriores protegidas de la lluvia -tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm
marina	aérea	IIla	corrosión por cloruros	-elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar -elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km)	-edificaciones en las proximidades de la costa -puentes en las proximidades de la costa -zonas aéreas de diques, pantalanés y otras obras de defensa litoral -instalaciones portuarias
	sumergida	IIlb	corrosión por cloruros	-elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar	-zonas sumergidas de diques, pantalanés y otras obras de defensa litoral -cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar
	en zona de mareas	IIlc	corrosión por cloruros	-elementos de estructuras marinas situadas en la zona de carrera de mareas	-zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantalanés y otras obras de defensa litoral -zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea
Con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	corrosión por cloruros	-instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino -superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas	-piscinas -pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve -estaciones de tratamiento de agua

Figura 1: Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras

1.2 Corrosión en ambiente marino

Como Valencia se encuentra en ambiente marino, centrare mi proyecto en este tipo de mecanismo de corrosión, es decir, la corrosión

del acero en el hormigón por intervención de una solución acuosa⁵, que es aquella que se produce por la acción de los cloruros.

Los cloruros presentes en el agua absorbida por el hormigón afectan a las armaduras, haciendo que estas lleguen a corroerse, aumentando así su volumen y como estas están en el interior de un pétreo que no es capaz de deformarse, da lugar a la aparición de fisuras en el hormigón. A causa de dicha lesión, se facilitará la posterior filtración de agua, que a su vez aumentará la aceleración del efecto de corrosión en dichas armaduras.

Así pues, el ataque por cloruros empieza con la picadura en las zonas débiles de la interfase acero - hormigón, como podemos observar en la Figura 2, y a continuación el proceso pasa por diversas fases hasta llegar a la corrosión de la armadura.

Una zona débil se puede originar debido a una caída particular del pH, a un hueco de aire por mala compactación, a una fisura del hormigón o a un defecto de la superficie del acero.

La formación de ánodos particulares en las zonas débiles establece diferencias de potencial que atraen cloruros. Al eliminar oxígeno en el inicio de la picadura, la superficie de acero situada bajo los productos sólidos de la corrosión se pica, según la siguiente ecuación:



⁵ Libro de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado, ECU editorial club universitario, autores: Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

La existencia de iones de cloruro también hace que la solubilidad de la capa pasiva aumente, lo que acelera su disolución.

El resultado que obtendremos será una acidificación (disminución del pH) mayor y una liberación de iones de cloruro. Ambos efectos aceleran la corrosión. Se han localizado valores de pH de 1,0 en las picaduras; con parecido pH, la disolución ácida del acero puede ser mucho más rápida, que la corrosión electroquímica.

En algunos casos también, el nivel de cloruros no es lo bastante elevado como para producir la corrosión por picaduras de la armadura, pero si como para iniciar la corrosión por hendidura en la interfase entre hormigón y barra; el mecanismo de esta corrosión podría continuar debiéndose a la disolución, la acidificación local por la hidrólisis de los iones de hierro y los procesos de acumulación de cloruros.

Los iones hidroxilos, que forman parte del cemento, son aquellos que intervienen en contra del proceso de corrosión reparando la capa dañada. El cemento tiene un pH elevado, que lo que hace es evitar la corrosión, pero en cambio si se produce en la capa exterior del hormigón el proceso de carbonatación, que es donde la cal apagada (hidróxido cálcico) del cemento reacciona con el dióxido de carbono del aire formando carbonato cálcico, dará lugar a una bajada del pH (ácido), que a su vez puede dar lugar a la corrosión de las armaduras, y entonces se produce la corrosión por picadura.

Este proceso necesariamente ocurrirá en medio acuoso, donde el dióxido de carbono reacciona con el agua formando ácido carbónico,

ya que este reaccionará con el hidroxilo de calcio, obteniendo como resultado el carbonato de calcio y agua.

La corrosión en las picaduras (ánodos) se produce electrolíticamente por reacciones catódicas en el área próxima del acero sin corroer (cátodo). Como habitualmente el área catódica es mayor que la anódica, la corrosión en las picaduras es intensa.

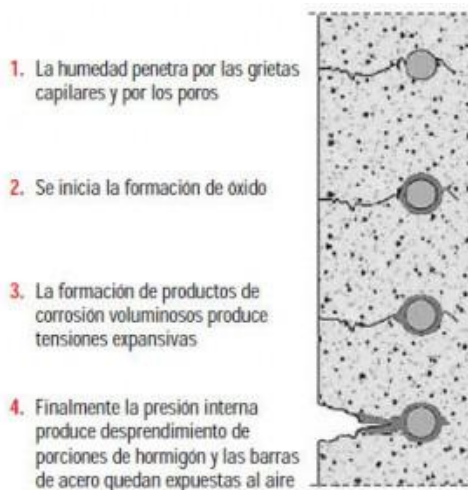


Figura 2: Esquema de la corrosión de las armaduras

El contenido crítico de cloruros es la parte de cloruros que causa la corrosión activa del acero.

Hasta el momento no se ha descubierto un valor único de este contenido crítico, debido a que varía en función de las características del hormigón (pH de la solución de los poros, temperatura, contenido de humedad, contenido de C_3A , tipo de catión que acompaña al cloruro

y finura del cemento, adiciones, etc.) y del acero (desigualdades de la superficie, composición, impurezas, envejecimiento). Todos estos parámetros intervienen en la naturaleza de la capa pasiva, lo que define el potencial eléctrico que muestra la armadura.

Además, la naturaleza de la capa pasiva progresa con el paso del tiempo, y por lo tanto también lo hace el potencial.

Pourbaix aseguró que pueden sufrir corrosión localizada aquellos aceros situados en soluciones alcalinas que contengan iones cloruros, por lo que para una concentración de cloruros determinada y un pH, se puede detectar un potencial por encima del cual el acero se corroe (llamado potencial de picadura) como podemos observar en la Figura 3.⁶

⁶ Libro de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado, ECU editorial club universitario , autores : Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

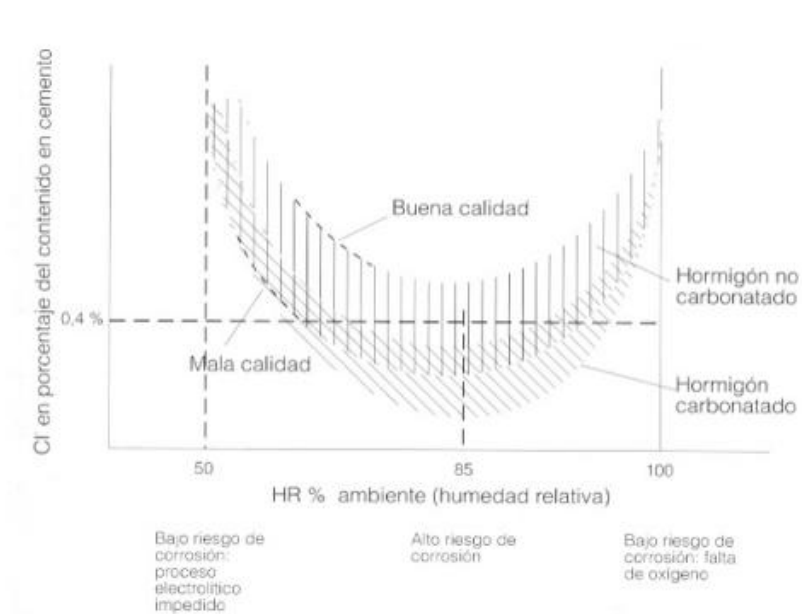


Figura 3: Variación del contenido crítico en cloruros según la humedad ambiente

Si siguiendo en la misma línea, se asocia el contenido de cloruros a un determinado riesgo de corrosión, como podemos comprobar en la tabla 1, interpretando los siguientes valores como una simplificación, ya que el contenido crítico de cloruros varía con la relación a/c (aumenta al reducirse la relación A/C).

Concentración de iones cloruros a la profundidad del acero(%p de cemento)	Riesgos para la iniciación de la corrosión
<0,4	Insignificante
0,4-1,0	posible
1,0-2,0	probable
>2,0	seguro

Tabla 1: Riesgo de corrosión de la barra de refuerzo con relación a los rangos de concentraciones críticas de iones cloruros totales y solubles

En ambientes completamente secos (H.R.< 60%), el riesgo de corrosión es mínimo, incluso si está carbonatado el hormigón, dado que el proceso electrolítico está imposibilitado. Excepto cuando haya alto contenido en cloruros, la corrosión es posible, incluso en ambientes secos, debido a los efectos higroscópicos de los cloruros, que incrementan el contenido en agua del hormigón.

En hormigones continuamente saturados de agua, el riesgo de corrosión es bajo debido a la falta de oxígeno, incluso si el hormigón está intensamente contaminado por cloruros, ya que dichos cloruros se encuentran disueltos en el agua y no en el cemento.

En cambio, en zonas donde la actuación del agua sobre el hormigón es de forma irregular la corrosión es segura, ya que cuando la marea es alta, el agua penetra por los poros del hormigón sin causar daño alguno, pero cuando la marea baja, el agua sale del hormigón pero se quedan depositadas las sales en dicho cemento.

Esta es la zona más afectada por las sales presentes en el agua, a causa de que cuando el agua interactúa con el cemento, las sales

están disueltas en el agua, pero cuando esta se aparta (baja la marea), dichas sales se quedan depositadas en el cemento, y son estos cloruros los que afectan directamente a las armaduras. Y si este proceso se repite durante varios periodos de tiempo, la cantidad de sales depositadas cada vez será más elevada por tanto, más cloruros y por tanto un aumento de la corrosión de las armaduras.

La corrosión verde o negra se produce en zonas donde el contenido de agua del hormigón es muy alto, limitando el acceso de oxígeno a las zonas anódicas. En este caso los productos de la corrosión no dan lugar a un gran incremento de volumen y pueden esparcirse por la estructura porosa del hormigón sin provocar desprendimientos.

Hay una gran influencia del contenido de humedad sobre la resistencia óhmica del hormigón, cuanto mayor es la humedad (50%, 100% o con poros saturados), menor es la resistencia óhmica.⁷

El aumento de la temperatura provoca un incremento de la movilidad de los iones y de la velocidad de corrosión, pero su disminución puede provocar condensaciones, que a su vez pueden dar lugar aumentos locales del contenido de humedad y por tanto provocar una disminución en la resistencia óhmica del hormigón.

⁷ Libro de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado, ECU editorial club universitario , autores : Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

Normativa específica para estructuras de hormigón armado en ambiente marino⁸

ACI 357R. Fixed offshore concrete structures

El contenido de C_3A en el cemento no debería ser inferior al 4% para proteger suficientemente a la armadura, y no debería ser superior al 10% para obtener un hormigón resistente a los sulfatos.

Para obtener una pasta de cemento de alta calidad alrededor de las armaduras y así protegerlas de la corrosión, se recomienda un contenido mínimo de 356 kg de cemento/ m^3 de hormigón.

El contenido de iones cloruro (Cl^-) solubles en agua en el hormigón, antes de ser expuesto al ambiente, no debería superar el 0,10 % en peso de cemento para el hormigón armado, ni el 0,06 % en peso de cemento para el hormigón pretensado. Un contenido de iones cloruros (Cl^-) de hasta el 0,15 % podría ser aceptable en el hormigón armado, pero solo se podría aplicar tras una evaluación del potencial de corrosión de una estructura concreta bajo determinadas condiciones ambientales.

Las relaciones agua / cemento y las resistencias mínimas a 28 días recomendadas para las diferentes zonas de exposición son las siguientes:

⁸ Libro de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado, ECU editorial club universitario, autores: Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

Zona	Máxima relación a/c	Resistencia mínima (MPa)
Sumergida	0,45	35
Mareas	0,40	35
Atmosférica	0,40	35

Tabla 2: Relaciones agua/cemento y las resistencias mínimas recomendadas para las diferentes zonas de exposición

Los recubrimientos recomendados para paredes gruesas de hormigón (al menos 50 cm de espesor) son los siguientes:

Zona	Recubrimiento sobre barras de acero (mm)	Recubrimiento sobre tendones de pretensado (mm)
Atmosférica no sometida a salpicaduras	50	75
Marcas y atmosférica sometida a salpicaduras	65	90
Sumergida	50	75
Recubrimiento de estribos	13 menos que los anteriores	-

Tabla 3: Recubrimientos recomendados

Los recubrimientos no deberían ser mucho mayores que los estipulados para restringir la anchura de las posibles fisuras.

En estructuras de menos de 50 cm de espesor se debería intentar mantener estos mismos recubrimientos, pero cuando no sea posible se pueden emplear la máxima de las siguientes recomendaciones con precaución :

- 1,5 veces el tamaño máximo de árido.
- 1,5 veces el diámetro de la barra mayor.
- 20 mm de recubrimiento a cualquier armadura (incluso estribos).

British Standard Code of Practice for maritime structures.BS6349

El mejor método para garantizar la elevada alcalinidad es lograr hormigones con la menor permeabilidad posible, lo que se consiguen adoptando mezclas de la mayor densidad posible. Esta elevada resistencia y baja permeabilidad debe conjugarse con una trabajabilidad adecuada.

En cuanto a la acción de los iones sulfatos presentes en el agua de mar, se deben emplear hormigones en los que se limite el contenido de aluminato tricalcico del cemento portland a un máximo del 10%, aunque no debe ser inferior al 4% para evitar el ataque de los cloruros a la armadura. Otras posibilidades son sustituir al menos el 25% del cemento portland por cenizas volantes o el 70% del cemento portland por escorias. No se deben emplear áridos ligeros.

El recubrimiento será preferiblemente de 75 mm, aunque nunca inferior a 50 mm hasta 300 mm.

Valores típicos de la velocidad de corrosión de aceros estructurales en ambiente marítimo del UK son:

Zona de exposición	Velocidad de corrosión (mm/año)
Por debajo del lecho marino.	0.01
Zona siempre sumergida: del lecho marino al nivel de mareas bajas de la primavera.	0.08
Zona sumergida con agua siempre fresca.	0.05
Parte inferior de la zona de mareas: entre el nivel de mareas bajas en primavera y con el mar en calma.	0.20
Zona de mareas: entre el valor medio de marea baja y el valor medio de marea alta.	0.09
Zona de salpicaduras: desde el valor medio de marea alta hasta una altura que es función de la altura de ola y la exposición al viento.	0.14
Zona atmosférica: por encima de la zona de salpicaduras y donde no es frecuente la humectación por olas o espuma.	0.10

Tabla 4: Valores típicos de la velocidad de corrosión de aceros estructurales en ambiente marítimo

2 Evaluación de los efectos de la corrosión

El acero cuando se oxida pierde muchas de sus propiedades y características típicas de este, como por ejemplo la resistencia a tracción, a compresión, al igual que la adherencia de este con el hormigón, además, al humedecerse, aumenta su volumen inicial por lo que provoca roturas y desperfectos en muchos casos irreparables en el hormigón que lo envuelve⁹.

2.1 En cuanto a seguridad

Cuando hablo de seguridad, lo hago pensando en la seguridad de estructuras de viviendas, estadios, edificios, balcones, escaleras, etc., que a simple vista presentan avanzado estado de corrosión.

En casi todos los casos se llega a tiempo para darse cuenta del peligro y repararlas, pero de vez en cuando se producen accidentes, incluso mortales.

También estamos acostumbrados a ver rehabilitación y reparación de balcones y fachadas de edificios porque las armaduras férreas internas se han oxidado y provocan desprendimientos peligrosos⁸.

⁹ Libro informativo de la empresa Galvanizadora Valenciana" Galesa" y de su página web: <http://www.galesa.com/v14/>

2.2 Pérdidas económicas

Durante varios años hubo un auge importante de la construcción, una forma de construir sin frenos, antes de terminar de construir una edificación esta ya estaba vendida , y los precios de las viviendas llegaban a un espectacular porcentaje casi equivalente a siete veces el crecimiento de los salarios.¹⁰

Pero hoy en día, aparte de estar en crisis dicho sector, después de tantos años de construcción, han aparecido grandes lesiones en las estructuras, y mayormente, por deficiencia de los materiales utilizados en la edificación o por su pésima forma de ejecución, en gran parte, a causa del gran "boom inmobiliario".

Las estructuras de hormigón armado forman una parte importante de nuestra infraestructura. La combinación de la alta resistencia a compresión del hormigón y las elevadas propiedades a tracción de la armadura de acero, da un material compuesto ideal que ofrece, comparando con otros materiales, un extenso abanico de aplicaciones en la ingeniería de estructuras.

En el proceso de diseño de estructuras, los ingenieros civiles y los arquitectos están igualmente implicados y frecuentemente se hace una distinción entre las circunstancias que afectan a la seguridad del edificio y aquellas que no crean un riesgo inmediato, pero sí que

¹⁰ Diario online "Expansión20", artículo sobre el "boom" inmobiliario en España, publicado por L. Ramírez. Madrid (<http://www.expansion.com/especiales/20aniversario/20economicos/inmobiliario.htm>)

pueden hacer que el edificio sea inservible. Este último requisito se refiere al estado límite de servicio de la estructura.

Pero no solo debe considerarse la carga mecánica, ya que toda estructura está expuesta a un ambiente que puede tener una enorme influencia en su durabilidad. Normalmente esta interacción entre el material de la estructura y el ambiente se llama corrosión.

Si estudiamos la historia del hormigón armado se encuentran pocos casos donde una estructura haya fallado debido a cargas mecánicas que no hayan sido consideradas en la fase de diseño. Las normativas técnicas dan bastante información a la hora de ofrecer una guía al técnico para diseñar una estructura apropiada para soportar todas las cargas mecánicas.

El problema, entonces, puede aparecer a causa de la falta de conocimiento y sensibilidad cuando se hace frente a cuestiones como la corrosión. Como se ha dicho anteriormente, pocas veces se encuentran fallos de las estructuras debido a sobrecargas pero se conoce un elevado número de estructuras en las que la corrosión y principalmente la **corrosión de la armadura** ha conducido a **reparaciones costosas y fallos prematuros**.

Por ello la corrosión de las armaduras en estructuras es en este momento un aspecto que aparece en el mantenimiento de edificios ya construidos y que ha contribuido a cierto número de colapsos estructurales.

Incluso después de 50 años de experiencia con los problemas de corrosión en estructuras de hormigón armado, puede encontrarse todavía la necesidad para los diseñadores de estructuras, de obtener una mayor comprensión de los factores y parámetros que perjudican a

la corrosión de las armaduras y una mejora o desarrollo de las normativas o códigos de práctica para poner más hincapié en la necesidad de diseñar para la durabilidad de las estructuras.

Por supuesto, no solo está el lado técnico del problema. Las intervenciones prácticas se manifiestan principalmente en las pérdidas económicas que pueden dar lugar a la pérdida de utilidad temporal o completa, el coste de las reparaciones y la monitorización, o en el peor de los casos la necesidad precipitada de demolición y sustitución¹¹.

Como he dicho anteriormente, en nuestro caso particular, en el sector de la construcción, la corrosión de las armaduras está identificada como uno de los mayores problemas en estructuras de hormigón, convirtiéndose en un asunto que requiere la atención de los profesionales del sector. El fenómeno de oxidación de las barras de acero daña gravemente las características funcionales del hormigón armado como la adherencia, además de inducir la formación de grietas y desprendimientos de trozos de hormigón, lo cual acaba implicando la totalidad estructural.

Valoraciones llevadas a cabo por comités de expertos, en corrosión y protección contra la corrosión, determinan las **pérdidas anuales** causadas por la corrosión alrededor del **3.5% del** producto interior bruto (**PIB**) de un país.

Estas cifras pueden estimarse como excesivamente optimistas, pues, en gran parte de los casos incluyen solo los costes directos de la

¹¹ Libro de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado, ECU editorial club universitario , autores : Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

corrosión provocados por las medidas de mantenimiento ,preventivas, o por sustitución de las partes corroídas, de tal manera que una valoración más real debería incluir las divisiones primarias, como pérdidas de producción, costes de las plantas durante el paro, coeficientes de seguridad en el diseño para prevenir los desgastes producidos por la corrosión, o disminución de la calidad en la producción a consecuencia de la impurificación con los productos de corrosión, entre otras.

En la **memoria Hoar**, ejemplo del que parten la mayoría de los estudios relacionados con los costes sociales de la corrosión, conocida desde hace más de 3 decenios, se apreciaba que las **pérdidas** por corrosión producidas en el sector de la construcción representaban el **18.3% del total** (250 millones de Libras de entonces), siendo superadas únicamente por las perdidas aplicadas a los sectores del transporte y las aplicaciones marinas.

Aceptando que los costes de la corrosión puedan aumentar hasta un 3.5% del PIB, los debidos al sector de la construcción se ubicarían algo por encima del 0.6 % de dicho índice.

Hay muy pocos estudios, realizados sistemáticamente y con rigor, sobre el efecto económico que ocasiona la corrosión de armaduras.

Los **estudios más fiables** son aquellos realizados **en EE.UU.**, aunque no son aplicables a otras zonas geográficas que tengan climas más templados.

En los gráficos de las Figuras 4 y 5 podemos ver los costes totales producidos en Estados Unidos en el año 1998.¹²

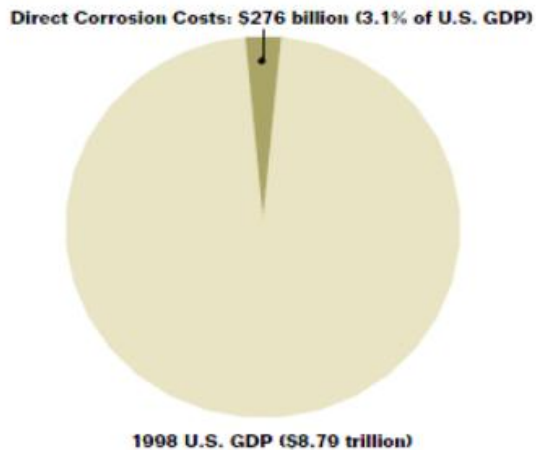


Figura 4: Coste total por corrosión en USA 1988. Fuente: artículo "Corrosion cost and preventive strategies in the United States". Año 2002.

¹² Trabajo Final de Máster sobre "Determinación de la velocidad de corrosión en armaduras mediante técnicas cuantitativas de análisis electroquímico " autor : Pablo Monzó Bello, visitada la página de Riunet el 11/06/14 (<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18242/Tesis%20Pablo%20Monzonl.pdf?sequence=2>)

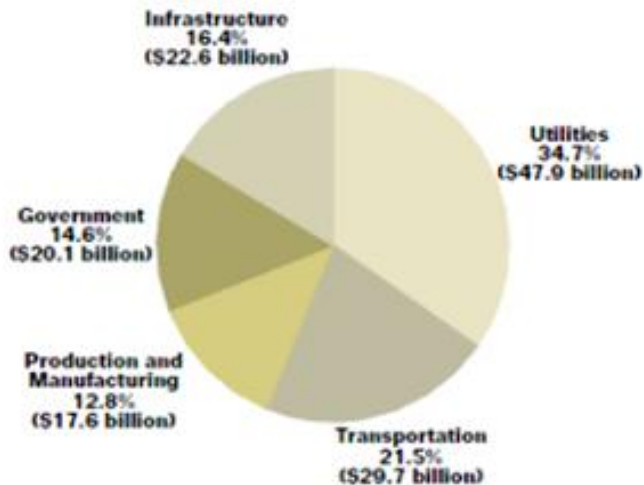


Figura 5: Coste por sectores industriales por corrosión en USA 1988. Fuente: artículo "Corrosion cost and preventive strategies in the United States". Año 2002

En nuestro país, se ha marcado una estimación actual del **coste de las reparaciones y sustituciones** a causa de los daños causados por la corrosión en las estructuras de hormigón armado, como vemos en la Figura 7, **en España en 1200 millones de euros anuales**.

Según datos de otro estudio "Corrosion Costs and Preventive Strategies in The United States",¹³ el coste de la corrosión de los

¹³ Blog del acero inoxidable, información sobre "El costo de la corrosión del acero en España alcanza el 2,2% del PIB" publicado el 18/10/11 y visitado el 07/05/14

metales se estima en torno al 6% del PIB mundial (un 3% de coste directo y otro 3% de coste indirecto) .

En el caso de **España**¹⁴, según datos del año 2007, el coste directo supera los 48.000 millones de euros. Si nos centramos sólo en el acero, los costes suponen en España el 2,2% del PIB, lo que supone más de 25.000 millones de euros, según los datos de la Asociación Técnica Española de Galvanización. Hay que tener en cuenta que el **acero se oxida** muy rápidamente: **4 milímetros de pérdida al año**. En los países de nuestro entorno, esta cifra desciende al 0,8 por ciento del PIB.

Centrándonos en la corrosión de estructuras mixtas hormigón-acero, la corrosión supone un elevado coste económico.



Figura 6: Corrosión en el acero

¹⁴ Trabajo Final de Máster sobre "Determinación de la velocidad de corrosión en armaduras mediante técnicas cuantitativas de análisis electroquímico " autor : Pablo Monzó Bello, visitada la página de Riunet el 11/06/14 (<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18242/Tesis%20Pablo%20Monzonl.pdf?sequence=2>)

La distribución de costes directos por sectores y el ahorro potencial que se podría producir se indican en la siguiente tabla¹⁵:

INDUSTRIA O SECTOR	COSTES ESTIMADOS (%)	AHORRO POTENCIAL (%)
Construcción	18	20
Alimentación	3	10
Ingeniería en general	8	30
Administración	4	40
Marina	21	20
Afino de met y semi elaborados	2	13
Petroleo y productos químicos	13	8
Energía	4	25
Transporte	25	25
Agua	2	15
	Total 100%	Promedio 23 %

Tabla 5: Costes estimados por daños de corrosión. Fuente: "Corrosión y degradación de materiales" Editorial Síntesis, capítulo I, pág. 19.

Habría que añadir a estos costes directos de la Tabla 5, los costes indirectos que se producen por el daño de tuberías, barcos, máquinas, **edificiones**, etc., que dan lugar a fugas, pérdidas de producción, pérdidas de productos almacenados, disminución de rendimiento de equipos, contaminación, reducción de la vida útil,

¹⁵ Trabajo Final de Máster sobre "Determinación de la velocidad de corrosión en armaduras mediante técnicas cuantitativas de análisis electroquímico " autor : Pablo Monzó Bello, visitada la página de Riunet el 11/06/14 (<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18242/Tesis%20Pablo%20Monzonl.pdf?sequence=2>)

patologías en otros elementos adyacentes, etc. Las pérdidas por estos conceptos son superiores a las pérdidas directas, situándose en una proporción entre 1:6 y 1:10.

Aproximadamente, **una cuarta parte** de la producción mundial de aceros se dedica a la reposición de estructuras afectadas por la corrosión.

En la encuesta sobre patologías elaborada por el Grupo Español del Hormigón (GEHO) en 1992 se revela que el 15% de las manifestaciones de daños producidos en estructuras se deben a problemas de corrosión de armaduras. En gran parte de los casos se producen en ambientes de humedad media o alta y en ambientes urbanos o marinos.

El coste de la reparación tiene un valor medio, comparándolo con el coste debido a la reparación de otro tipo de daños de procedencia diferente, si bien en el 6% de los casos hubo que proceder a la demolición de la estructura.

En el 67,6% de los casos, las patologías se produjeron en edificios de más de 10 años.

3 Marco legal

3.1 Aspectos normativos

Por regla general¹⁶, cualquier disposición que implique una limitación de la porosidad del hormigón contribuye a la durabilidad del sistema hormigón - armadura.

Las reglas que conciernen a la necesidad de un curado húmedo del hormigón tendrán una importancia muy particular, puesto que los primeros centímetros del recubrimiento del hormigón son muy sensibles a los efectos de la desecación.

Las otras disposiciones, directamente relacionadas con la corrosión de las armaduras, conciernen a la limitación en el contenido de iones cloruros, la fijación del espesor del recubrimiento mínimo y la limitación del tamaño de las fisuras en el hormigón armado.

- Limitación del contenido de iones cloruros: Si bien los distintos componentes del hormigón, agua, cemento, árido y aditivos tienen sus respectivas limitaciones parciales, la Instrucción del Hormigón Estructural (EHE) establece en su artículo 30.1 que la cantidad total de ion cloruro aportado por los componentes a la mezcla no excederá de un 0.2 %, en peso del cemento para hormigones pretensados ni de un 0.4 % en peso del cemento para hormigón armado o en masa conteniendo armaduras (de control de fisuración).

¹⁶ Libro de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado, ECU editorial club universitario , autores : Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

- Espesor mínimo de recubrimiento: El artículo 7.2.4. de la Instrucción EHE establece los recubrimientos mínimos de hormigón sobre las armaduras, que dependen de la clase de exposición del elemento, del tipo de elemento(in situ, prefabricado, laminas) de la resistencia del hormigón y del control de ejecución .

Deberá ser indicado en el proyecto por el autor del mismo, los valores han aumentado respecto de los que indicaba la anterior Instrucción EH-91.

La tabla 4.2 del Eurocódigo 3,Part 1.1, establece también los valores de recubrimiento mínimo según el tipo de exposición, para hormigones armados pretensados, y que a continuación en la tabla 6 os presentamos:

Condiciones de exposición	Espesor mínimo de revestimiento de las armaduras (en cm)
Entorno seco en el interior de locales	1
Entorno húmedo y agresivo para obras expuestas a las inclemencias, condensaciones y en contacto con los líquidos	3 o 2, si la resistencia característica del hormigón es superior a 40 MPa
Entorno muy agresivo por exposición al mar, a las brumas, nieblas salinas, sales fundentes y en atmosfera químicamente agresiva	5 o 3, si las armaduras están protegidas por un procedimiento eficaz

Tabla 6: Revestimientos mínimos de las armaduras según condiciones de exposición

- Limitación del ancho de fisura : La instrucción EHE y el Eurocódigo 2, Parte 1.1, establecen los valores máximos del ancho de fisura en los artículos 4.9.2.4 y 4.4.2 respectivamente. Dichos valores máximos, diferentes para el hormigón armado y pretensado, dependen también del tipo de ambiente.

Los estudios que conciernen a la fisuración superficial no han revelado una agravación determinante de la corrosión cuando el ancho de la fisura no excede los 0.4 mm en ausencia de cloruros.

3.2 Código Técnico de la Edificación (CTE)

En el código técnico de la edificación se hace referencia a la corrosión de un modo distendido, citándose como posible causa del deterioro de la estructura junto con otras afecciones, así mismo también se recomienda su control y evaluación como muestran los artículos extraídos de la propia norma. Si bien es cierto que, en los documentos básicos de seguridad estructural y anexos y en el documento básico de seguridad estructural acero, se hace mención a la corrosión, pero es en la instrucción de hormigón estructural donde se hace un mayor hincapié.

Objeto

“El Código Técnico de la Edificación, en adelante CTE, es el marco normativo por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer los requisitos básicos establecidos en el artículo 3 de la LOE.

Estas exigencias básicas deben cumplirse en el proyecto, la construcción, el mantenimiento y la conservación de los edificios y sus instalaciones.”

Seguridad Estructural (DB-SE)

Artículo 10. Exigencias básicas de seguridad estructural (CTE)

El objetivo del requisito básico "Seguridad estructural" consiste en asegurar que el edificio tiene un comportamiento estructural adecuado frente a las acciones e influencias previsibles a las que pueda estar sometido durante su construcción y uso previsto.

Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, fabricarán, construirán y mantendrán de forma que cumplan con una fiabilidad adecuada las exigencias básicas que se establecen en los apartados siguientes.

Las estructuras de hormigón están reguladas por la Instrucción de Hormigón Estructural vigente.

- Estados límite

Se denominan estados límite aquellas situaciones para las que, de ser superadas, puede considerarse que el edificio no cumple alguno de los requisitos estructurales para las que ha sido construido.

- Estados límite últimos

Los estados límite últimos son los que, de ser superados, constituyen un riesgo para las personas, ya sea porque producen una puesta fuera de servicio del edificio o el colapso total o parcial del mismo. Como estados límite últimos deben considerarse los debidos a:

a) pérdida del equilibrio del edificio, o de una parte estructuralmente independiente, considerado como un cuerpo rígido.

b) fallo por deformación excesiva, transformación de la estructura o de parte de ella en un mecanismo, rotura de sus elementos estructurales (incluidos los apoyos y la cimentación) o de sus uniones, o inestabilidad de elementos estructurales incluyendo los originados por efectos dependientes del tiempo corrosión y/o fatiga.

Anejo C Principios de los métodos probabilistas explícito e implícito (SE)

Se pueden distinguir dos tipos de problemas variables en el tiempo:

a) fallos debidos a una sobrecarga;

b) fallos por acumulación de daños como la fatiga y/o **corrosión**.

La dependencia del tiempo se debe a la variabilidad en el tiempo de las acciones e influencias y/o de la resistencia (mecanismos de deterioro). En general, las acciones, influencias o resistencias que sean variables en el tiempo, se deben representar a través de procesos estocásticos.

Anejo D Evaluación estructural de edificios existentes (SE)

D.3 Recopilación de información

Los daños y anomalías existentes: deformaciones, desplazamientos, corrosión, fatiga y envejecimiento en general.

D.6 Evaluación cualitativa Capacidad portante

El edificio se ha utilizado durante un periodo de tiempo suficientemente largo sin que se hayan producido daños o anomalías (desplazamientos, deformaciones, fisuras, corrosión, etc.)

Seguridad Estructural ACERO (DB-SE-A)

13 Inspección y mantenimiento

Es conveniente que en la inspección del edificio se realice una específica de la estructura, destinada a la identificación de daños de carácter frágil como los que afectan a secciones o uniones (corrosión localizada, deslizamiento no previsto de uniones atornilladas, etc.) daños que no pueden identificarse a través de sus efectos en otros elementos no estructurales. Es recomendable que este tipo de inspecciones se realicen al menos cada 20 años.

3.3 Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)

En los capítulos 2, 6 y 7 junto con el anejo 9, se trata el tema de la corrosión.

En el segundo capítulo de la norma, criterios de seguridad y bases de cálculo, hace mención clara a los **tipos de ambientes** y diferentes exposiciones a las que las estructuras se han de ver expuestas. Estas exposiciones se mencionan para tener clara la actuación a seguir en todo el proceso de construcción de la estructura teniendo muy en cuenta los procesos corrosivos que pueden darse lugar en función de los agentes agresivos. Además se hace mención a normativa UNE específica para cada tipo de agente.

En el capítulo seis de la instrucción, materiales, habla de cómo se deben de tratar con los diferentes materiales para evitar los problemas de corrosión.

Es en el séptimo capítulo de la norma, durabilidad, donde se indica las estrategias a seguir para evitar los problemas de corrosión en

las armaduras, además de definir los posibles métodos de protección de las barras de acero.

En este último capítulo ya se hace una mención muy clara a los iones cloruros y sulfuros sobre la corrosión.

Por último en el anejo número nueve de la instrucción, consideraciones adicionales sobre durabilidad, habla de dos tiempos básicos en el proceso, el tiempo que tarda en ser afectada la armadura y el tiempo por el cual se propaga en la armadura. Además tiene en cuenta el fenómeno de la carbonatación.

Objeto

“Esta Instrucción de Hormigón Estructural, EHE, es el marco reglamentario por el que se establecen las exigencias que deben cumplir las estructuras de hormigón para satisfacer los requisitos de seguridad estructural y seguridad en caso de incendio, además de la protección del medio ambiente, proporcionando procedimientos que permiten demostrar su cumplimiento con suficientes garantías técnicas.

Las exigencias deben cumplirse en el proyecto y la construcción de las estructuras de hormigón, así como en su mantenimiento. Esta Instrucción supone que el proyecto, construcción y control de las estructuras que constituyen su ámbito de aplicación son llevados a cabo por técnicos y operarios con los conocimientos necesarios y la experiencia suficiente.

Además, se da por hecho que dichas estructuras estarán destinadas al uso para el que hayan sido concebidas y serán adecuadamente mantenidas durante su vida de servicio.”

CAPITULO VII DURABILIDAD

Artículo 37º Durabilidad del hormigón y de las armaduras

Generalidades

La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

Una estructura durable debe conseguirse con una estrategia capaz de considerar todos los posibles factores de degradación y actuar consecuentemente sobre cada una de las fases de proyecto, ejecución y uso de la estructura.

Una estrategia correcta para la durabilidad debe tener en cuenta que en una estructura puede haber diferentes elementos estructurales sometidos a distintos tipos de ambiente.

Estrategia para la durabilidad

Medidas especiales de protección

En casos de especial agresividad, cuando las medidas normales de protección no se consideren suficientes, se podrá recurrir a la disposición de sistemas especiales de protección, como los siguientes:

- Aplicación de revestimientos superficiales con productos específicos para la protección del hormigón (pinturas o revestimientos), conformes con las normas de la serie UNE-EN 1504 que les sean de aplicación.

- Protección de las armaduras mediante revestimientos (por ejemplo, armaduras galvanizadas).
- Protección catódica de las armaduras, mediante ánodos de sacrificio o por corriente impresa, según UNE-EN 12696.
- Armaduras de acero inoxidable, según UNE 36067.
- Aditivos inhibidores de la corrosión.

Las protecciones adicionales pueden ser susceptibles de tener una vida útil incluso más pequeña que la del propio elemento estructural. En estos casos, el proyecto deberá contemplar la planificación de un mantenimiento adecuado del sistema de protección.

Corrosión de las armaduras

Las armaduras deberán permanecer exentas de corrosión durante todo el período de vida útil de la estructura. La agresividad del ambiente en relación con la corrosión de las armaduras, viene definida por las clases generales de exposición según 8.2.2.

Para prevenir la corrosión, se deberán tener en cuenta todas las consideraciones relativas a los espesores de recubrimiento, indicadas en 37.2.4.

Con respecto a los materiales empleados, se prohíbe poner en contacto las armaduras con otros metales de muy diferente potencial galvánico, salvo en el caso de sistemas de protección catódica.

Esta Instrucción contempla la posibilidad de emplear sistemas para la protección de las armaduras frente la corrosión, de acuerdo con lo indicado en 37.2.7.

Asimismo, se recuerda la prohibición de emplear materiales componentes que contengan iones despasivantes, como cloruros, sulfuros y sulfatos, en proporciones superiores a las indicadas en los Artículos 27º, 28º, 29º y 30º 37.4.1

Corrosión de las armaduras pasivas

Además de la limitación específica del contenido de iones cloruro para cada uno de los materiales componentes, se deberá cumplir que el contenido total de cloruros en un hormigón que contenga armaduras no activas, sea inferior a los siguientes límites 0,4% del peso del cemento en obras de hormigón armado u obras de hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración.

Corrosión de las armaduras activas

En el caso de estructuras pretensadas, se prohíbe el uso de cualquier sustancia que catalice la absorción del hidrógeno por el acero.

Además de la limitación específica del contenido de iones cloruro para cada uno de los materiales componentes, el contenido total de cloruros en un hormigón pretensado no deberá superar el 0,2% del peso del cemento.

Se prohíbe la utilización de empalmes o sujeciones con otros metales distintos del acero, así como la protección catódica.

4 Propuestas para evitar la corrosión

El problema de corrosión empezó a causar grandes preocupaciones en nuestro sector, ya que se comprobó que se debían de invertir miles de millones para la sustitución o reparación de las infraestructuras actuales, a causa de las lesiones que estaban surgiendo a raíz de varias propiedades indeseables que tiene el acero.

Entre los métodos de protección sobre el acero más empleados destacan ¹⁷:

1. Recubrimientos metálicos
2. Recubrimientos plásticos, resinas y pinturas sobre la armadura
3. Protección catódica
4. Utilización de aceros inoxidables
5. Utilización de galvanizado en caliente

Sin embargo, estas alternativas han sido bastante decepcionantes, ya que tienden a tener un costo prohibitivo y / o ineficaces.

Pero en este proyecto no voy a realizar un método de protección sobre el acero, sino una de las soluciones que se está adoptando ya en muchas partes del mundo, y aquí se está investigando.

Es la sustitución del acero por un nuevo material que es el basalto.

¹⁷ Libro de corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado, ECU editorial club universitario , autores : Pedro Garcés Terradillo, Miguel Ángel Climent Llorca, Emilio Zornoza Gómez.

En primer lugar, vamos a conocer los materiales de los cuales vamos hablar y a comparar en el presente estudio.

4.1 Acero

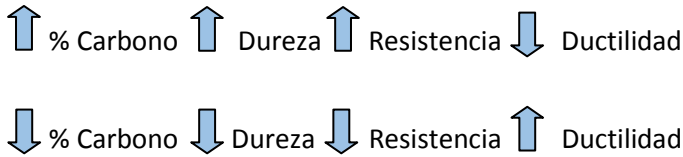
El acero es una aleación en caliente de carbono con el metal hierro y puede tener más aleaciones como el azufre, fósforo, manganeso, etc... en la que el porcentaje de carbono no supera el 2% en peso.

Cuando los valores son superiores al 2% de carbono se forman fundiciones y aleaciones con muy pequeña cantidad de carbono y se denomina hierro o hierro dulce.

La diferencia entre ambos es que las fundiciones se fabrican mayormente por moldeo, mientras que los aceros son, por su ductilidad, fácilmente deformables en caliente mediante la técnica de forja, extrusión o laminación.

De hecho el acero también se le ha conocido como "hierro forjable" y a la fundición "hierro colado" en virtud de la técnica más favorable para trabajar el material.

El acero se distingue del hierro dulce en que este puede templarse adquiriendo una gran dureza mientras que el hierro dulce (dúctil y blando, aunque resistente) no puede endurecerse mediante dicho procedimiento, incluso a este estado endurecido se le llama "acritud" por contraposición a la "dulzura" natural del hierro. Así se definen los aceros al carbono en los que éste último es el único aleante o los demás presentes lo están en cantidades muy pequeñas (insuficientes para que su presencia cause modificaciones en las características de la aleación).



Existe gran variedad de **tipos** de acero con composiciones muy diversas:

1. Aceros al silicio: En virtud de los elementos que predominan en su composición.
2. Aceros de cementación : Su susceptibilidad a ciertos tratamientos .
3. Aceros estructurales: En función de su uso.
4. Acero inoxidable : Según alguna característica potenciada .

El acero se puede obtener a partir de dos materias primas fundamentales:¹⁸

- El arrabio, obtenido a partir de mineral en instalaciones dotadas de alto horno (proceso integral).
- Las chatarras tanto férricas como inoxidables.

El tipo de materia prima limita el proceso de fabricación. Para fabricar acero a partir de arrabio se emplea el convertidor con oxígeno, mientras que partiendo de chatarra como única materia prima se utiliza solamente el horno de arco eléctrico (proceso electro-siderúrgico).

¹⁸ Documento online sobre la fabricación del acero
(<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/7/55868-7.pdf>)
consultado el 22/06/14

Los procesos en **horno de arco eléctrico** pueden utilizar casi un 100% de chatarra metálica como primera materia , transformándolo en un proceso más adecuado desde un punto de vista **ecológico**.

Aunque la media de las estadísticas actuales valora que el 85% de las materias primas empleadas en los hornos de arco eléctrico son chatarra metálica.

Las valoraciones del porcentaje mundial de industrias que emplean el convertidor con oxígeno en 1995 eran del 59% y de un 33% para aquellas que empleaban horno de arco eléctrico.

Las aleaciones de acero se producen mayormente mediante el horno de arco eléctrico, incluyendo el acero inoxidable. En algunos tipos de acero inoxidable se añade a su composición molibdeno, titanio, niobio u otro elemento con el fin de conferir a los aceros distintas propiedades.

Después del proceso de reconversión industrial de la siderurgia en España se abandonó la vía del alto horno y se dio iniciativa por la obtención de acero a través de horno eléctrico.

En este proceso, la materia prima es la chatarra, a la que se le da una atención especial, con el fin de obtener un alto grado de calidad de la misma. Para ello, la chatarra es sometida a unos estrictos controles e inspecciones por parte del fabricante de acero, tanto en su lugar de origen como en el momento de la recepción del material en fábrica.

La calidad de la chatarra depende de tres factores:

- Su facilidad para ser cargada en el horno.

- Su comportamiento de fusión (densidad de la chatarra, tamaño, espesor, forma).
- Su composición, siendo fundamental la presencia de elementos residuales que sean difíciles de eliminar en el proceso del horno.

Atendiendo a su procedencia, la chatarra se puede clasificar en tres grandes grupos:

a) **Chatarra reciclada:** formada por despuntes, rechazos, etc. originados en la propia fábrica. Se trata de una chatarra de excelente calidad.

b) **Chatarra de transformación:** producida durante la fabricación de piezas y componentes de acero (virutas de máquinas herramientas, recortes de prensas y guillotinas, etc.).

c) **Chatarra de recuperación:** suele ser la mayor parte de la chatarra que se emplea en la acería y procede del desguace de edificios con estructura de acero, plantas industriales, barcos, automóviles, electrodomésticos, etc.

Fabricación en horno eléctrico

La fabricación del acero en horno eléctrico consiste en la fusión de las chatarras por medio de una corriente eléctrica, y al posterior afino del baño fundido.

El horno eléctrico se basa en un gran recipiente cilíndrico de chapa gruesa (15 a 30 mm de espesor) revestido de material refractario que forma la solera y alberga el baño de acero líquido y escoria. El resto del horno está constituido por paneles refrigerados por agua. La bóveda

es desplazable para posibilitar la carga de la chatarra mediante unas cestas adecuadas.

La bóveda tiene una serie de orificios por los que se introducen los electrodos, generalmente tres, que son barras gruesas de grafito de hasta 700 mm de diámetro. Los electrodos se mueven de forma que se puede regular su distancia a la carga a medida que se van consumiendo.

Los electrodos están conectados a un transformador que facilita unas condiciones de voltaje e intensidad apropiadas para hacer saltar el arco, con intensidad variable, en función de la fase de operación del horno.

Otro orificio realizado en la bóveda permite la captación de los gases de combustión, que son depurados convenientemente para evitar contaminar la atmósfera. El horno va montado sobre una estructura oscilante que le permite bascular para proceder al sangrado de la escoria y el vaciado del baño.

El proceso de fabricación se reparte especialmente en dos fases como podemos ver en la Figura 7: la fase de **fusión** y la fase de **afino**.¹⁹

¹⁹ Video online sobre la fabricación de barras de acero actualizado el 15/10/09 y visto el 25/07/14 (<https://www.youtube.com/watch?v=JFXESHN-SdM>)

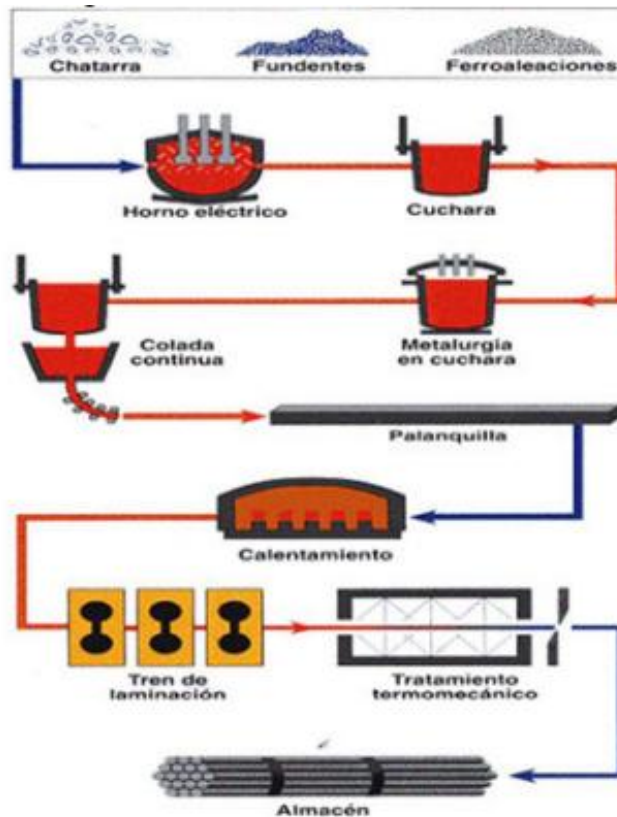


Figura 7: Fabricación del acero en horno eléctrico

Fase de fusión

Cuando se introduce la chatarra en el horno y los agentes reactivos y escorificantes, principalmente cal.

Se desplaza la bóveda con el fin de cerrar el horno y se bajan los electrodos hasta la distancia adecuada, haciéndose saltar el arco hasta

fundir completamente los materiales cargados. Este proceso se repite hasta completar la capacidad del horno, formando este acero una colada.

Fase de afino

El afino se realiza en dos etapas. La primera en el propio horno y la segunda en un horno cuchara.

En el **primer afino** se analiza la composición del baño fundido y se procede a la eliminación de elementos indeseables (silicio, manganeso, fósforo, etc.) y impurezas, y realizar un primer ajuste de la composición química mediante la adición de ferroaleaciones que contienen los elementos necesarios (cromo, níquel, molibdeno, vanadio o titanio).

El acero obtenido se vacía en una cuchara de colada, envuelta de material refractario, que hace la función de cuba de un **segundo horno de afino**, en el que finalmente se termina de ajustar la composición del acero y de darle la temperatura apropiada para la siguiente fase en el proceso de fabricación.

La colada continua

Una vez finalizado el afino, la cuchara de colada se traslada hasta la artesa receptora de la colada continua donde descarga su contenido en una artesa receptora.

La colada continua es un procedimiento siderúrgico en el que el acero se vacía directamente en un molde de fondo desplazable, cuya sección transversal tiene la forma geométrica del producto que se desea fabricar; en este caso la palanquilla.

La artesa receptora tiene un orificio de fondo, por el que distribuye el acero líquido en diversas líneas de colada, cada una de las cuales dispone de su molde, generalmente de cobre y paredes huecas para permitir su refrigeración con agua, que servirá para dar forma al producto.

Durante el proceso, la lingotera se desplaza sucesivamente hacia arriba y hacia abajo, con el fin de soltar la costra sólida que se va formando durante el enfriamiento. A continuación se aplica un sistema de enfriamiento controlado, primeramente por medio de duchas de agua fría, y al aire después, cortándose el producto en las longitudes que se desean mediante sopletes que se desplazan durante el corte.

En todo momento el producto se encuentra en continuo movimiento gracias a los rodillos de arrastre colocados a lo largo de todo el sistema.

Finalmente, se identifican todas las palanquillas con el número de referencia de la colada a la que pertenecen, como parte del sistema implantado para determinar la trazabilidad del producto, vigilándose la cuadratura de su sección, la sanidad interna, la ausencia de defectos externos y la longitud obtenida.

Fase de laminado

Las palanquillas no se utilizan directamente, sino se deben transformar en productos comerciales mediante el proceso de laminación o forja en caliente.

La laminación se puede describir como un proceso en el que se hace pasar al producto (palanquilla) entre dos rodillos o cilindros, que

giran en sentidos contrarios pero a la misma velocidad, disminuyendo su sección transversal gracias a la presión producida por éstos.

Se aprovecha la ductilidad del acero en este proceso, es decir, su capacidad de deformarse, cuanto mayor es su temperatura mayor es su deformación. De ahí que la laminación en caliente se produzca a temperaturas comprendidas entre 1.250°C, al inicio del proceso, y 800°C al final del mismo.

La **laminación** sólo permite obtener productos de sección constante, como es el caso de las **barras corrugadas**.

El proceso empieza mediante hornos de recalentamiento que lo que hacen es elevar la temperatura de las palanquillas hasta un valor inmejorable para ser introducidas en el tren de laminación.

Generalmente estos hornos son de gas y en ellos se diferencian tres zonas: de precalentamiento, de calentamiento y de homogeneización.

El paso de las palanquillas de una zona a otra se realiza por medio de distintos dispositivos de avance. La atmósfera en el interior del horno es oxidante, con el fin de reducir al máximo la formación de cascarilla.

Una vez se tenga la temperatura deseada en toda la masa de la palanquilla, ésta es conducida a través de un camino de rodillos hasta el tren de laminación. Este tren está formado por parejas de cilindros que van disminuyendo la sección de la palanquilla. Primero de la forma cuadrada a forma de óvalo, y después de forma de óvalo a forma redonda.

A medida que disminuye la sección, aumenta la longitud del producto transformado y, por tanto, la velocidad de laminación. El tren está controlado de forma automática, de manera que la velocidad de las distintas cajas que lo componen va aumentando en la misma proporción en la que se redujo la sección en la anterior.

El tren de laminación se divide en tres partes:

- Tren de desbaste: donde la palanquilla soporta una primera pasada muy ligera para romper y eliminar la posible capa de cascarilla formada durante su estancia en el horno.
- Tren intermedio: constituido por diferentes cajas en las que se va conformando por medio de continuas pasadas la sección.
- Tren acabador: donde el producto experimenta su última pasada y obtiene su geometría de corrugado.

Las barras ya laminadas se colocan en una gran placa o lecho de enfriamiento.

De ahí, son transportadas a las líneas de corte a medida y empaquetado y después pasan a la zona de almacenamiento y expedición.

Durante la laminación se controlan los distintos parámetros que definirán la calidad del producto final: la temperatura inicial de las palanquillas, el grado de deformación de cada pasada (para evitar que una deformación excesiva dé lugar a roturas o agrietamientos del material), así como el grado de reducción final, que define el grado de forja, y sobre todo el sistema de enfriamiento controlado.

En la producción del acero se tiene el producto final cuando se le elimina todo el óxido que trae de su estado natural siendo el material más importante para la construcción.

Tipos de acero:

1. **Acero al carbono** : Es aquel que tiene entre 0.1 y 1.9 % de carbono en su contenido y no se le añade ningún otro material (otros metales).
2. **Acero de baja aleación:** Es aquel acero al que se le añaden otros metales para mejorar sus propiedades.
3. **Tenor:** Es el porcentaje de óxido de hierro que tiene algún metal en su condición natural.

El acero tiene tanto características positivas como negativas. En cuanto a características **positivas**²⁰, en primer lugar, los aceros son materiales de alta resistencia mecánica, al someterlos a esfuerzos de tracción y compresión y lo soportan por la contribución química que tienen estos.

Por medio de los ensayos de laboratorio determinan la resistencia a tracción y la compresión evaluando su límite elástico y el esfuerzo de rotura.

La elasticidad del acero es muy alta, en un ensayo de tracción del acero al estirarse antes de llegar a su límite elástico este vuelve a su condición original.

²⁰ Portal online sobre arquitectura, ingeniería, decoración de interiores & hogar (<http://www.arqhys.com/construccion/acero-caracteristicas.html>) visitado el 03/08/14

La soldabilidad en este tipo de material cabe decir que se puede unir por medio de soldadura y gracias a esto se pueden componer una serie de estructuras con piezas rectas.

Los aceros, por lo que se refiere a la ductilidad tienen una elevada capacidad de esta, es decir, alta capacidad de ser trabajados los aceros, doblarlos y torcerlos. Se pueden cortar y perforar a pesar de que es muy resistente y aun así siguen manteniendo su eficacia.

La forjabilidad de los aceros significa que estos al calentarse y al darle martillazos se les puede dar cualquier forma deseada.

Por otra parte, los aceros, también tienen características **negativas**²¹, como por ejemplo, la oxidación, los aceros tienen una capacidad alta de oxidarse si se exponen al aire y al agua simultáneamente y se pueden producir corrosión del material si se trata de agua salina.

Los aceros son grandes transmisores de calor y electricidad, por tanto, el acero es un alto transmisor de corriente y a su vez se debilita mucho a altas temperaturas, por lo que es preferible utilizar aceros al níquel o al aluminio o tratar de protegerlos haciendo ventilados y evitar hacer fábricas de combustibles o plásticos con este tipo de material.

Estas dos desventajas son manejables teniendo en cuenta la utilización de los materiales y el mantenimiento que se les dé a los mismos.

²¹ Portal online sobre arquitectura, ingeniería, decoración de interiores & hogar (<http://www.arqhys.com/construccion/acero-caracteristicas.html>) visitado el 03/08/14

Si nos centramos en el acero que nos interesa en nuestro ámbito, el **acero corrugado** es una clase de acero laminado usado especialmente en construcción, para emplearlo en hormigón armado.

Se trata de barras de acero que presentan resaltos o corrugas, como se observa en la figura 8, que mejoran la adherencia con el hormigón. Está dotado de una gran ductilidad, la cual permite que a la hora de cortar y doblar no sufra daños, y tiene una gran soldabilidad, todo ello para que estas operaciones resulten más seguras y con un menor gasto energético.

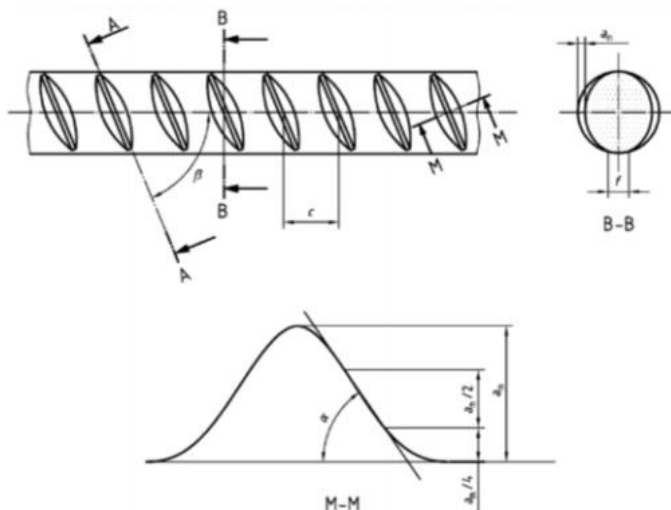


Figura 8: Altura de corruga UNE-EN ISO 15630-1:2003

Las barras de acero corrugado están normalizadas. Por ejemplo, en España las regulan las normas: UNE 36068:1994- UNE 36065:2000 – UNE36811:1998.

Las barras de acero corrugados se producen en una gama de diámetros que van de 6 a 40 mm, en la que se cita la sección en cm^2 que cada barra tiene así como su peso en kg. Las barras inferiores o iguales a 16 mm de diámetro se pueden suministrar en barras o rollos, para diámetros superiores a 16 siempre se suministran en forma de barras.

Las barras de producto corrugado tienen unas características²² técnicas que deben cumplir, son las que mostramos en la tabla 7 , para asegurar el cálculo correspondiente de las estructuras de hormigón armado. Entre las características técnicas destacan las siguientes, todas ellas se determinan mediante el ensayo de tracción.²³

²⁴

²² Fichas informativas gratuitas online del acero para hormigón con certificado aenor, de la empresa Calsider.
(<http://www.calsider.es/imagecatalogue/imageview/375/?RefererURL=/article/articleview/261/1/5/>)

²³ Video youtube sobre el ensayo de tracción en barra de acero. El vídeo muestra la gráfica de fuerza aplicada (en kN) vs. alargamiento (en cm) a lo largo de la prueba, indicando los nombres de las fases más importantes que se atraviesan. Publicado el 20/05/2013 y visto el 03/08/14 (<https://www.youtube.com/watch?v=4p7bvJGN4Po>)

²⁴ Video youtube sobre Rebar Tensile Strength Test - www.kouryengineering.com (909) 606-6111 Yield and Ultimate Yield, Concrete Compression, Testing and Inspection Services, actualizado el 5/11/09 y visto el 11/08/14 (https://www.youtube.com/watch?v=CXdJSEb_DLc)

Características		Barras corrugadas			
Tipo de acero		B 400 S	B 500 S	B 400 SD	B 500 SD
Norma de producto		UNE 36068	UNE 36068	UNE 36065	UNE 36065
Límite elástico R_e (MPa)		400	500	400	500
Carga unitaria de rotura R_m (MPa)		440	550	480	575
Relación R_m/R_e		1,05	1,05	$\geq 1,20$ $\leq 1,35$	$\geq 1,15$ $\leq 1,35$
Relación R_e real/ R_e nominal		-	-	$\leq 1,20$	$\leq 1,25$
Alargamiento de rotura A_5 (%)		14	12	20	16
Alargamiento total bajo carga máxima A_{gt} (%)	Suministrado recto	5,0	5,0	7,5	7,5
	Suministrado en rollo*	7,5	7,5	10,0	10,0

Tabla 7: Propiedades mecánicas de la armadura pasiva

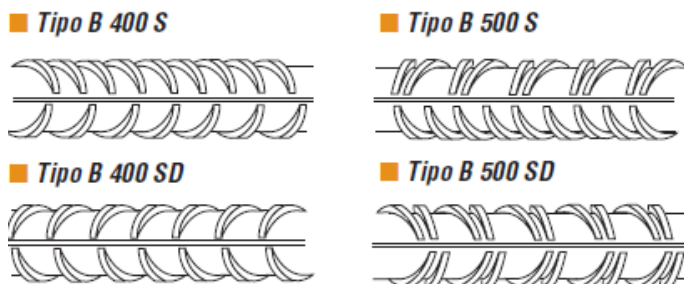


Figura 9: Tipos de acero corrugado

Otra característica que podemos obtener del acero es la resistencia de cálculo, la cual obtendremos una vez conocidas las dos situaciones en que nos podemos encontrar:

Las situaciones correspondientes a situaciones de Estado Límite Último (E.L.U) son las siguientes:

- Pérdida de equilibrio
- Agotamiento resistente del material
- Inestabilidad de la estructura o parte de ella (elementos comprimidos)
- Fallos debidos a rotura frágil o fatiga del material
- Fallos de las uniones

Las segundas situaciones son aquellas debidas a los Estados Límites de Servicio (E.L.S):

- Deformaciones o flechas que afectan a la apariencia de la estructura o que dañan a otros elementos constructivos (tabiques, fachadas..)
- Vibraciones que producen incomodidad a las personas o que limitan la capacidad funcional del edificio.
- Excesiva corrosión

Situación de proyecto	Hormigón γ_c	Acero Pasivo y Activo γ_s
Persistente o Trayectoria	1,5	1,15
Accidental	1,3	1,0

Tabla 8: Tabla de coeficientes de minoración de resistencias ELU

El **coeficiente** de minoración de resistencias **E.L.S** es : $\gamma_c = \gamma_s = 1,00$

Para el cálculo de la resistencia de cálculo del acero mediante E.L.U, aplicaremos la siguiente fórmula:

$$\text{Resistencia de cálculo del acero} \quad F_{yd} = \frac{F_{yk}}{\gamma_s}$$

donde:

F_{yk} límite elástico característico del acero

$$\text{B400SD} \quad F_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{B500SD} \quad F_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

γ_s coeficiente de minoración resistencia del acero = 1,15

Designación	Modulo de elasticidad del acero (N/mm ²)	Resistencia de cálculo del acero mediante coeficientes E.L.U
B400SD	200000	347,83
B500SD	200000	434,78

Tabla 9: Propiedades del acero en armadura pasiva

El diagrama tensión - deformación de cálculo del acero (UNE 7474-1:92) para armaduras pasivas se deduce del característico, mediante una afinidad oblicua paralela a la recta de Hooke, como observamos en la Figura 10.

La segunda rama puede tomarse horizontal.

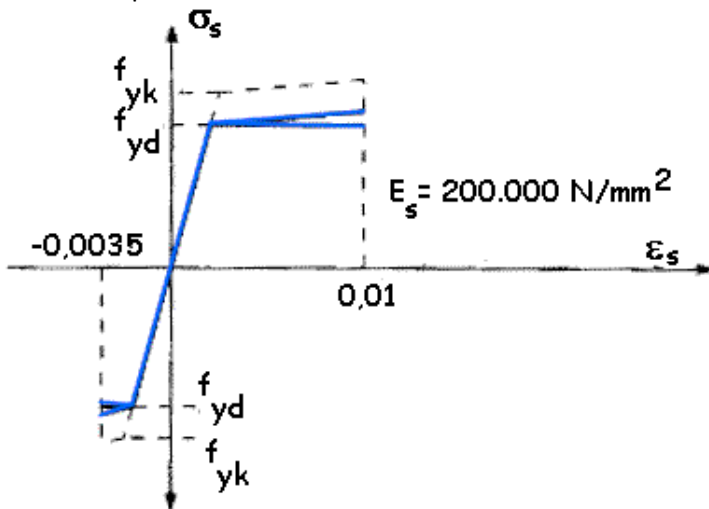


Figura 10: Diagrama tensión-deformación de cálculo para armaduras pasiva:

Otras de las características que tiene el acero pero de forma generalizada es:

Modulo de Rigidez (N/mm^2)	Coefficiente de Poisson	Coefficiente de dilatación térmica	Densidad (kg/m^3)
81000	0,3	$1,2 \cdot 10^{-5} (\text{°C})^{-1}$	7850

Tabla 10 : Propiedades comunes de los aceros

4.2 Basalto

El basalto²⁵ es una roca ígnea volcánica máfica y extrusiva. El principal componente es la sílice aunque destaca el alto contenido en hierro y magnesio. Está formado mayoritariamente por dos minerales: piroxeno y feldespato. También está constituido, aunque de forma minoritaria, por olivino o anfíbol.

Al ser una roca ígnea volcánica, se forma cuando el magma se enfría y se solidifica. La composición del magma y, sobre todo, la distinta velocidad de enfriamiento es lo que da lugar a los distintos tipos de rocas que existen en la corteza terrestre.

Las rocas ígneas volcánicas se suelen clasificar atendiendo a dos criterios: el lugar donde solidifica el magma y la composición química mayoritaria.

Atendiendo al lugar donde solidifica el magma, las rocas ígneas pueden clasificarse en intrusivas o extrusivas. Se denominan intrusivas cuando la solidificación tiene lugar en el interior de la corteza terrestre, y extrusivas cuando la solidificación del magma se produce en la superficie de la corteza terrestre, normalmente tras una erupción volcánica. El enfriamiento de las rocas extrusivas es mucho más rápido que el de las rocas intrusivas, formando estructuras de grano fino.

²⁵ Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Jesús Poveda Bernal Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla; publicada en Valladolid, Julio 2012

Si la clasificación es por la composición mayoritaria, las rocas ígneas pueden ser félsicas, máficas, andesíticas y ultramáficas.

La diferencia está en la cantidad de silicatos “claros” y “oscuros”. Los silicatos claros están formados mayoritariamente por potasio, sodio y calcio, mientras que los silicatos oscuros están formados mayoritariamente por hierro y magnesio.

Las rocas félsicas (graníticas) están constituidas mayoritariamente por silicatos claros, la proporción de silicatos oscuros es inferior al 10%, las rocas máficas (basálticas) están formadas mayoritariamente por silicatos oscuros y calcio y por otra parte las rocas andesíticas tienen al menos un 25% de silicatos oscuros.

Por composición, están comprendidas entre las rocas félsicas y las rocas máficas. Por último, se denominan rocas ultramáficas a aquellas que tienen un contenido en silicatos oscuros mayor al 90%.

Aunque no son comunes en la superficie de la tierra se cree que son los constituyente principal del manto superior de la corteza terrestre. En la siguiente tabla 11²⁶ se muestra un breve resumen de las principales rocas ígneas atendiendo al doble criterio de clasificación.

²⁶ Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Jesús Poveda Bernal Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla; publicada en Valladolid, Julio 2012

	Félsicas	Andesíticas	Máficas	Ultramáficas
Intrusivo	Granito	Diorita	Gabro	Peridotita
Extrusivo	Riolita	Andesita	Basalto	Komatita

Tabla 11: Principales rocas ígneas volcánicas

Composición y Estructura

A diferencia de lo que ocurre con el vidrio, debido a la procedencia geológica del material base, es normal pensar que la materia prima utilizable para la fabricación de fibra de basalto²⁷ facilitará unas características físico-químicas y morfológicas particulares en función del yacimiento de procedencia.

El componente principal de cualquier tipo de magma volcánico es el silicio. Por lo tanto, la estructura básica de todas las rocas formadas a partir de magma serán silicatos. La gran variedad de silicatos que existen en la naturaleza es a casusa de la facilidad de sustitución isomórfica de los átomos de Silicio por otros elementos y la descompensación de carga eléctrica que provocan. Esta descompensación puntual de carga eléctrica da lugar a la incorporación en las redes de sílice de una gran variedad de cationes metálicos. La

²⁷ Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Jesús Poveda Bernal Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla; publicada en Valladolid, Julio 2012

propia red de silicio, puede tomar diversas formas en función de las condiciones bajo en las que se haya formado.

El proceso mediante el cual el magma fundido se transforma en los diferentes tipos de rocas ígneas volcánicas es complejo y no totalmente conocido.

El tipo de roca que se pueden conseguir del magma depende tanto de la velocidad de enfriamiento de este como de la composición química del mismo.

Además, a medida que el magma volcánico se va solidificando varía la composición química y, por tanto, el tipo de roca que se puede formar.

El Dr. N.L. Bowen ²⁸ en la década de 1920, realiza la teoría más importante para explicar el inicio de los diferentes tipos de rocas ígneas que se pueden encontrar en el magma solidificado. El modelo se conoce como "*Series de Bowen*" y constituye, aún en el presente, el punto de inicio para explicar la gran diversidad de tipos de rocas ígneas existentes.

En la teoría elaborada por el Dr Bowen, las rocas ígneas se van formando de forma sucesiva, en función de la temperatura de

²⁸ Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Jesús Poveda Bernal Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla; publicada en Valladolid, Julio 2012

cristalización y de la composición química, siguiendo dos series: la serie continua y la serie discontinua.

En la siguiente Figura 11 se representa la evolución que desarrollan las rocas ígneas, tanto en la serie discontinua como en la serie continua.

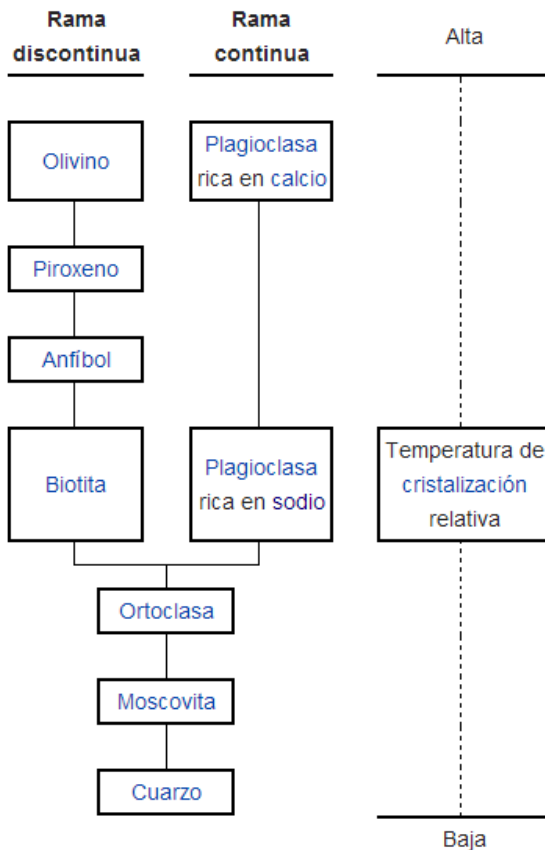


Figura 11; Teoría de Bowen, serie continua y discontinua

En la serie discontinua, el primer tipo de roca en cristalizar es el silicato de estructura más sencilla (olivino), a continuación se crean los silicatos más complejos hasta llegar a la Biotita.

En la serie continua se van formando los distintos tipos de feldespatos, empezando con los feldespatos ricos en calcio y terminando con los feldespatos ricos en sodio.

En un determinado punto las dos series se juntan y las rocas creadas siguen evolucionando hasta conseguir cuarzo. La estructura totalmente exacta del cuarzo, solamente puede crearse cuando el resto de elementos distintos del Silicio (Al, Fe, Mg, Na, Ca, etc....) ya han formado otras estructuras.

A continuación en la Figura 12 ²⁹, se muestran, esquemáticamente, las rocas ígneas formadas en función del tipo de magma de partida y la temperatura.

²⁹ Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Jesús Poveda Bernal Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla; publicada en Valladolid, Julio 2012

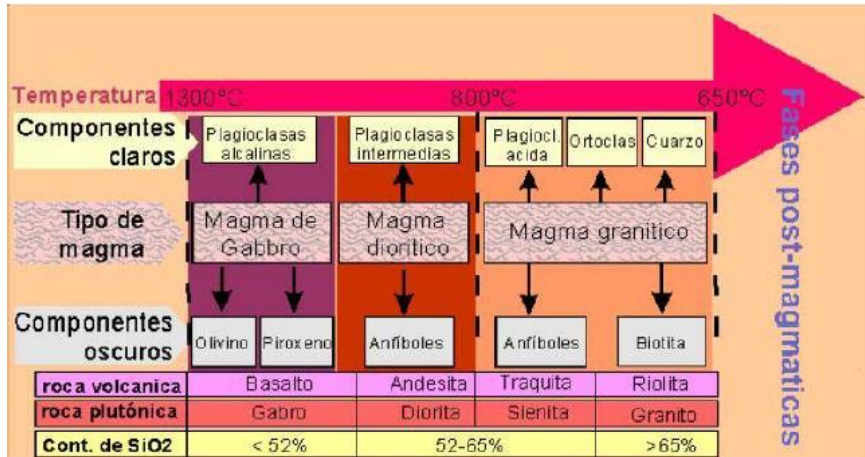


Figura 12: Resumen de la formación de rocas ígneas en función del tipo de magma

Debido a la variedad química del magma de partida y a la variación del proceso de enfriamiento según el lugar donde solidifica el magma, los distintos tipos de rocas obtenidos tienen variación significativa del porcentaje de minerales constituyentes.

En la Figura 13³⁰ que mostramos a continuación, se puede ver una distribución de composiciones aproximadas para los más representativos tipos de rocas ígneas magmáticas.

³⁰ Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Poveda Bernal, Jesús Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla; publicada en Valladolid, Julio 2012

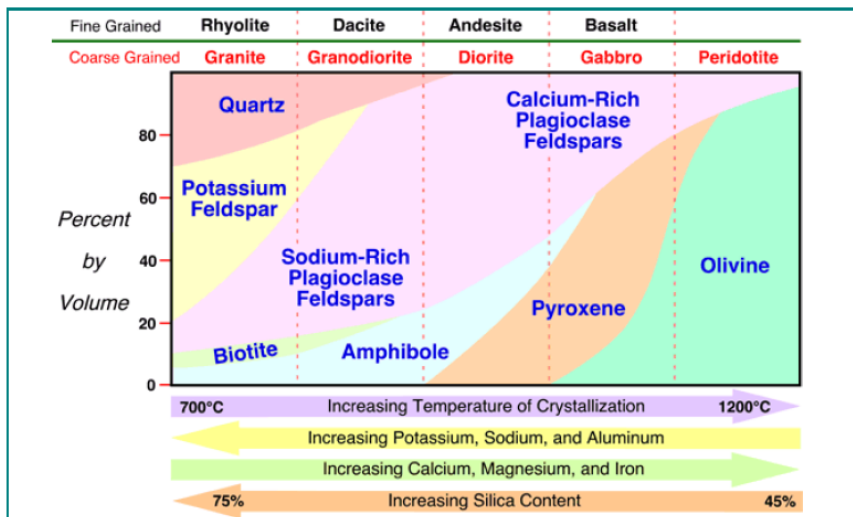


Figura 13: Composición aproximada de las principales rocas ígneas volcánicas

Centrándonos en la familia del basalto, podemos ver como la composición puede cambiar drásticamente. Podemos encontrar basaltos sin anfíbol y con altos contenidos de olivino y piroxeno. En el extremo contrario podemos encontrar basaltos sin olivino, cantidades variables de anfíbol y gran cantidad de feldespato cálcico.

Valorando la diferente variedad de composiciones que puede tener la materia prima utilizable para la fabricación de fibra de basalto, resulta evidente la extrema dificultad de controlar un proceso de extrusión/hilado en continuo.

Del mismo modo, resulta fácil entender la estrategia habitual de los principales fabricantes de fibra de basalto de utilizar un único yacimiento para obtener la materia prima con la que fabricar sus productos.

El olivino, piroxeno y el anfíbol son silicatos de distinta complejidad mientras que el feldespato de plagioclasa cálcico es un aluminio-silicato. En todos los casos la carga eléctrica está compensada por la incorporación de cationes metálicos.

El basalto es una de las rocas más abundantes en la corteza terrestre, aunque también es una roca que la podemos encontrar en la superficie de Marte, la Luna o incluso en algunos meteoritos. Este se ha utilizado a lo largo de la historia como material de construcción por gran variedad culturas, entre ellas los olmecas de México, o en el Antiguo Egipto.

Una de las principales propiedades del basalto es su alta dureza, lo que hace que hoy en día sea empleado en forma de fibras artificiales reforzar estructuras de hormigón.

Este tiene un coeficiente de dilatación térmica muy bajo, por lo que recibe poco deterioro en incendios, a pesar de ser una roca que tiende a calentarse mucho por la radiación solar debido a sus propiedades químicas (llegando a registrar temperaturas de hasta 80º).

Otra de sus principales propiedades es su impermeabilidad, aunque no es aconsejable para ciertas obras hidráulicas debido a su excesiva fracturación.

Tabla de propiedades:³¹

- **Aspecto y forma**

- Color oscuro (gris, negro o azulado)
- Fácil fractura

- **Propiedades físicas**

- Buena impermeabilidad
- Alta densidad (2.8-2.9 g/cm³)

- **Propiedades mecánicas**

- Gran dureza (4.8-6.5 en el índice de Mohs)
- Difícil corte / difícil de tallar
- Gran resistencia a la compresión (1800 kg/cm²)
- Menor resistencia a los agentes atmosféricos
- Poco abrasiva

- **Características térmicas**

- Bajo coeficiente de dilatación térmica
- Buena resistencia al fuego
- Buena conducción térmica

³¹ Artículo sobre "los materiales en la arquitectura" en el Blog (<http://eauclmmateriales.blogspot.com.es/2012/06/2-el-basalto.html>) publicado el 4/06/12 y visitado el 09/07/14

Capítulo 2.

Revisión Bibliográfica del Basalto

1 Introducción

En este capítulo se presentan los antecedentes del empleo de barras de BFRP como barras de refuerzo del hormigón.

Entre los materiales utilizados a lo largo de la historia en el ámbito de la construcción, cabe destacar uno de ellos que ha estado en uso desde la década de los 40, pero que recientemente ha ganado la atención de los ingenieros involucrados en la construcción de estructuras civiles: los compuestos de polímeros reforzados con fibras (FRP).³²

Las estructuras de hormigón armado mediante barras de FRP se han utilizado en ambientes agresivos durante más de 23 años en diversas partes del mundo sin ningunos problemas estructurales (ACI, 2006).

Los primeros intentos de producir fibra de basalto se realizaron en los Estados Unidos en 1923. Estas fueron desarrolladas después de la Segunda Guerra Mundial por los investigadores en los EE.UU., Europa y la Unión Soviética, especialmente para aplicaciones militares y

³² Tesis Doctoral sobre "Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP" autora: Almerich Chulia, Ana Isabel del año 2010.

aeroespaciales. Desde desclasificación en 1995 , las fibras de basalto se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones civiles.

En el año 1983, se dio lugar al primer proyecto subvencionado por el Departamento de Transporte de EE.UU. (USDOT) "Transfer of Composite Technology to Design and Construction of Bridges "(Plecnik y Ahmad, 1988). Los japoneses hasta mediados de la década de 1990, realizaron la mayoría de suministros de los armados de FRP, con más de 100 proyectos.

En Asia³³, China se ha convertido recientemente en el mayor consumidor de armado de FRP para obras de nueva construcción, en aplicaciones que abarcan desde las cubiertas de puentes a las obras del metro (Ye et al., 2003).

El uso del armado de FRP en Europa se inició en Alemania, con la construcción de un puente en 1986 con armado de FRP pretensado (Meier, 1992).

Al igual que también en Europa, el proyecto EUROCRETE realizó un tablero de puente totalmente armado con redondos de FRP en 1996, como observamos en la Figura 14.³⁴

³³ Tesis Doctoral sobre " Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

³⁴ Tesis Doctoral sobre "Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP" autora: Almerich Chulia , Ana Isabel del año 2010.

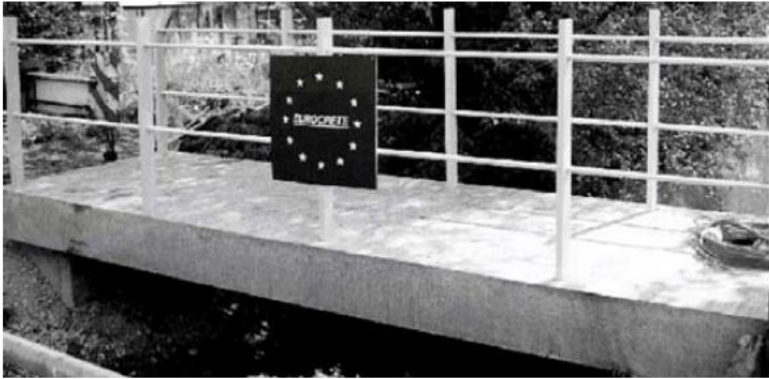


Figura 14:Puente totalmente armado con redondos de FRP. EUROCRETE Project

Los FRP están formados generalmente por fibras de alta resistencia embebidas en una matriz de resina. Los FRP más utilizados en aplicaciones de ingeniería civil son el de carbono (CFRP), el de aramida (AFRP) y el de vidrio (GFRP), aunque últimamente aparece el de basalto (BFRP), que es el material el cual voy analizar en el presente estudio .

Este material, el basalto, no está incluido en ninguna norma al no existir todavía valores, diríamos constitutivos más que característicos.

En la práctica, trabajan como refuerzo interno en elementos de hormigón armado y pretensado, anclajes del terreno y en la reparación o refuerzo de las estructuras existentes de hormigón (Pakalnis et al, 1994), (Mizutani, 1994). Sin embargo, su uso en el armado del hormigón en elementos estructurales, ha sido muy limitado debido principalmente a la falta de datos, especificaciones de diseño o normas o códigos para proyecto.

A diferencia de lo que ocurre con la fibra de vidrio³⁵, existe una gran diferencia cronológica entre la utilización, por parte del hombre, del basalto como material y de su utilización en forma de fibra.

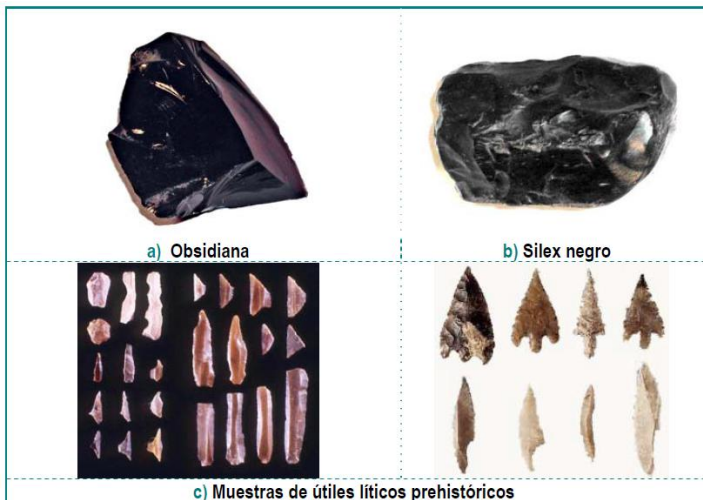


Figura 15: Muestra de obsidiana, sílex y útiles líticos prehistóricos

A causa de la facilidad que presentan ciertos silicatos (sílex y obsidiana principalmente) para formar trozos cortantes (lascas) cuando son golpeados, este tipo de materiales han sido utilizados por el hombre,

³⁵ Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Poveda Bernal, Jesús Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla; publicada en Valladolid, Julio 2012

desde hace millones de años, para la fabricación de útiles y de armas primitivas.

En la Figura 15 se pueden observar ejemplos de rocas utilizadas en la fabricación de herramientas y algunos ejemplos de utensilios fabricados con rocas ígneas.

El primer intento de utilización del basalto en forma de fibra se debe a la corporación Johns-Manville.

A lo largo de la década de 1920-1930 intentaron hilar roca basáltica para obtener hilos que pudieran usarse en textiles ignífugos.

Con este primer trabajo se demostraron dos aspectos básicos de este material: la dificultad para hilarlo en forma de filamento continuo y las mayores prestaciones térmicas comparadas con la fibra de vidrio de la época.

El hecho esencial en el desarrollo de la fibra de basalto se produce a partir de **1960**, en plena Guerra Fría, cuando se transforma en un material estratégico en el ámbito militar. En esta época ambas potencias tenían el mismo problema en el desarrollo de los escudos térmicos de los misiles balísticos intercontinentales (ICBM's). La reentrada en la atmósfera de los ICBM's se produce a velocidades próximas a los 30.000 km/h, generando, por fricción con la atmósfera, temperaturas extremas, superiores a las que puede soportar la fibra de vidrio (800 °C).

Como solución a este problema hacía falta materiales ligeros que pudieran resistir estas temperaturas extremas.

Estados Unidos optó por el desarrollo de la fibra de carbono, mientras que la **Unión Soviética** ³⁶se interesó por el desarrollo de la fibra de **basalto**.

Desde el inicio del interés por el desarrollo de la fibra de basalto (década de 1960) hasta la aparición de las primeras patentes de un proceso controlado para la producción de este material (década de 1990) se han realizado varios estudios para controlar esta tecnología.

Como hemos analizado, existe una gran diferencia temporal entre los procesos patentados de obtención de fibra de vidrio (década de 1930) y los de fibra de basalto.

El primer intento de proceso que permitiera obtener fibra de basalto de manera controlada fue plagiar la tecnología que ya se había desarrollado para la obtención de fibra de vidrio.

Los primeros estudios llevados a cabo por el equipo del Dr. Galina Andreevskaya (Instituto de Física-Química de la URSS), aunque no tuvieron el éxito esperado, dieron lugar a los problemas primordiales asociados al proceso que se pretendía dominar.

La producción de fibra de basalto es muy sensible a las variaciones de temperatura de la masa fundida y a la homogeneidad de

³⁶ Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Poveda Bernal, Jesús Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla; publicada en Valladolid, Julio 2012

la misma, por lo tanto se decidió utilizar dos hornos secuenciales, un primer horno de fusión y un segundo horno de estabilización.

Otro de los grandes problemas relacionado con la producción de fibra de basalto de manera continua era la rotura aleatoria de la fibra durante el proceso de estirado.

Se podían obtener fibras de basalto del orden de 20 mm de longitud, pero los intentos de obtener fibra continua fracasaban sistemáticamente al completo.

Como solución a este problema, el proyecto de desarrollo de la fibra de basalto fue re-dirigido al Instituto de Ciencias de Materiales de Kiev, dirigido en aquella época por el Dr. Viktor Trefilov, especialista en aleaciones de Platino-Rodio. Con el conocimiento del grupo de trabajo dirigido por el Dr. Trefilov se logró diseñar un material nuevo con el que fabricar el “*spinneret*” (placa agujereada por la que se hace pasar a presión el basalto fundido).

Este nuevo material desarrollado era una nueva aleación de Platino-Rodio con un agente lubricante que permitía el hilado continuo del basalto fundido de manera estable y homogénea.

Desde que se tiene absoluto dominio de la tecnología hasta la actualidad se están produciendo importantes avances en la **utilización** de este material en múltiples sectores productivos, principalmente en aplicaciones ignífugas y de elevada resistencia térmica corrosiva.

En la última década se han desarrollado y consolidado compañías que se dedican exclusivamente a la fabricación de fibra de basalto cada vez más específica y orientada a la aplicación final que se pretende desarrollar.

Compañías como Kamenny Vek, Basaltex y Techno Basalt han experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años.

En la actualidad existe una corriente emergente de investigación y utilización de la fibra de basalto como refuerzo en la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica.

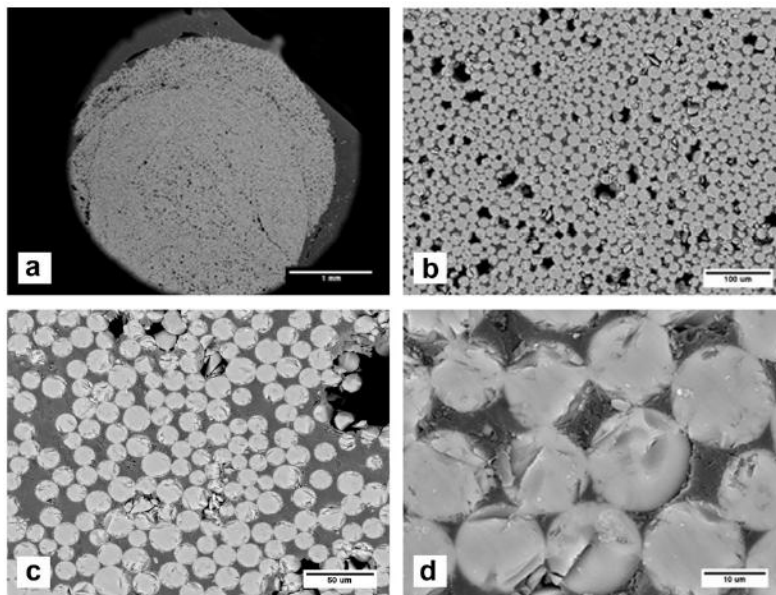


Figura 16: Barras de BFRP (imagen electrones retrodispersados): sección transversal (A), zooms consecutivos (b-d) necesarios para determinar, usando software de análisis de imagen, número medio de filamentos y el diámetro del filamento. Es posible observar que la resina moja adecuadamente las fibras creando un fuerte interfaz de fibra / matriz. Los daños producidos a la fibra también son visibles, probablemente debido a la etapa de corte para el análisis SEM.

2 Fabricación

El proceso de **fabricación de fibra de basalto** continua es, conceptualmente, muy parecido al proceso de fabricación de la fibra de vidrio³⁷.

En la figura 17, que tenemos a continuación se puede observar, de forma esquemática, las etapas básicas del proceso de obtención de fibra de basalto.

La roca de basalto triturada es almacenada en un silo **(1)**, a través de una estación de carga **(2)** y de un sistema transportador **(3)** es llevado hasta la zona de alimentación del horno principal **(4)**. En el horno principal **(5)** se funde la roca basáltica a una temperatura variables en función de la composición de la roca (en el intervalo 1450 - 1600 °C). Una vez que la roca ha sido fundida es trasvasada a un segundo horno **(6)** denominado horno de mantenimiento.

La necesidad de un horno de mantenimiento es la principal diferencia con el proceso de fabricación de la fibra de vidrio. Este segundo horno, cuya misión es homogenizar la temperatura de la masa fundida, es de vital importancia para poder conseguir un proceso de hilado en continuo sin rotura de la fibra.

³⁷ Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid sobre "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" autor: Poveda Bernal, Jesús Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla; publicada en Valladolid, Julio 2012

A la salida del horno de homogeneización se forman los filamentos individuales haciendo pasar la masa de roca fundida a través del “*spinneret*” (7).

A partir de este punto, el resto de elementos de la línea son análogos a los utilizados para la fabricación de la fibra de vidrio continua. Una vez que se han formado los hilos individuales se procede al proceso de aplicación de los componentes orgánicos (8), los filamentos individuales forman hebras (9). Utilizando una estación tensora (10) se procede al enrollado automático de los filamentos fabricados (11).

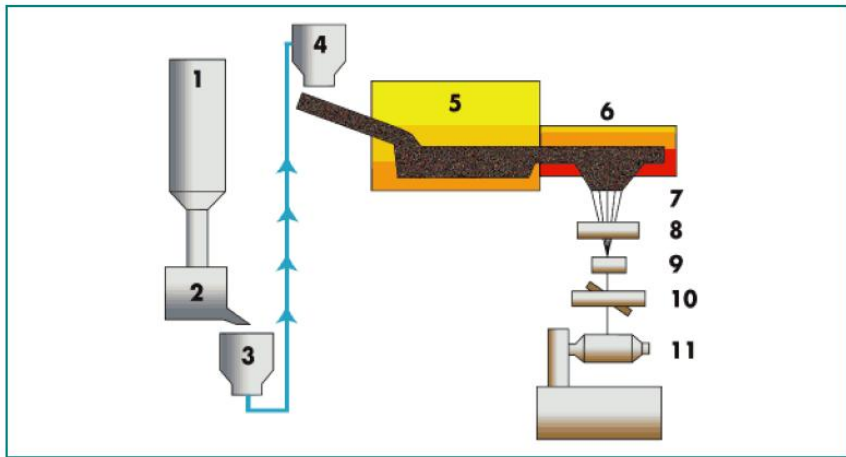


Figura 17: Esquema del proceso de obtención de la fibra de basalto

Como hemos visto anteriormente, la fibra de basalto está hecha de un solo material, basalto aplastado, de una fuente de cantera cuidadosamente elegido y a diferencia de otros materiales tales como

fibra de vidrio, esencialmente no se añaden materiales. El basalto es simplemente lava y luego enviado a ser fundidos.

La fabricación de fibra de basalto requiere la fusión de la roca de basalto cantera a aproximadamente 1400 C. La roca fundida se extruye a continuación a través de pequeñas boquillas, estirado(hilado), para producir filamentos continuos de fibra de basalto. Existen tres técnicas principales de fabricación, que son centrífuga de soplado, centrífuga-rollo múltiple y morir-soplado.

Una vez obtenida la fibra de basalto, pasamos a la fabricación de las barras de fibra de basalto, Figura 18³⁸.

El proceso de fabricación utilizado para formar barras de refuerzo de material compuesto se conoce como pultrusión, como podemos observar en la Figura 19.

La **pultrusión** es equivalente a extrusión, y se utiliza para formar materiales compuestos de formas largas y continuas como varillas, barras y, en este caso, las barras de refuerzo.

Este es un proceso productivo de conformado de materiales plásticos termorrígidos para obtener perfiles de plástico reforzado, de forma continua, sometiendo las materias primas a un arrastre y parado por operaciones de impregnado, conformado, curado y corte. Este proceso se caracteriza por un buen acabado superficial.

³⁸ Catálogo informativo de la empresa suministradora de barras de basalto " Thermalguard Technology, LLC" facilitada la información el 3/07/14.

El **proceso** a seguir será el siguiente:

En primer lugar se procede al desenrollado y distribución de las fibras de basalto, que estarán agrupadas en filamentos continuos en una parte del mecanismo de producción.

Seguidamente pasamos a la impregnación de la resina y control de la relación resina-basalto.

A continuación se produce el preformado gradual hasta alcanzar el perfil final.

Una vez obtenido el perfil final, se procede al conformado y curado de la matriz.

Y ya por último, se realiza el postcurado y el corte.

Este tipo de proceso hace posible obtener productos con un contenido de fibra alto, entre el 60% y 80% en volumen, con una distribución homogénea de fibras en la sección transversal del redondo.

En tales casos, como he explicado anteriormente, las fibras son impregnadas con resina, estiradas atravesando el molde cerrado y caliente, que compacta y endurece el material, el cual se enrolla o corta a una longitud determinada.

Para mejorar la adherencia con el hormigón, se aplican tratamientos superficiales a la barra de BFRP antes de su endurecimiento completo, por uno los siguientes métodos: (1) una envoltura de uno o más cabos de fibras enrollados a lo largo de la longitud de la barra; (2) unos salientes, a modo de cordones transversales al eje longitudinal de la barra; (3) una envoltura por medio de un tejido, a lo largo de la longitud de la barra, creando una

impresión complementaria; o que los tejidos superficiales actúen de zunchado de las mechas interiores. En este caso, se procede a un lijado superficial una vez completado el endurecimiento y (4) la adherencia por medio de resinas, de un grano fino a la superficie de la barra.

Además, las varillas de BFRP de pequeño diámetro pueden ser trenzadas para formar un cable, como se hace comúnmente con los de acero, o cortadas para proceder al refuerzo del hormigón mediante fibras cortas.



Figura 18: Proceso de fabricación de barras de BFRP

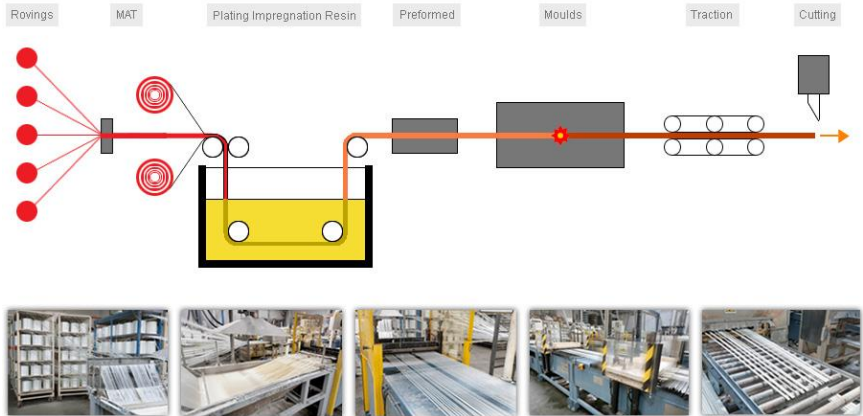


Figura 19: Proceso de Pultrusión

Las ventajas que este proceso de fabricación al elaborar dichos productos son las siguientes:

1. Alta rigidez y resistencia.
2. Bajos costos de producción.
3. Producción continua.
4. Alta velocidad de producción.
5. Versatilidad de formas.
6. Buen acabado superficial.
7. Posibilidad de obtener grandes longitudes.
8. Equipo económico.
9. Selección direccional de propiedades.
10. Flexibilidad sin perder resistencia.

Y por otra parte las propiedades que este proceso de fabricación proporciona a los productos elaborados son las siguientes:³⁹

- Resistencia a la corrosión
- Baja conductividad térmica y eléctrica
- Transparencia magnética y electromagnética
- Baja densidad
- Elevada resistencia mecánica
- Estabilidad dimensional

3 Interface fibra - matriz

Los polímeros son, esencialmente compuestos orgánicos, formados por carbono e hidrógeno. Estos compuestos pueden obtenerse de la naturaleza o por síntesis de moléculas orgánicas en laboratorios.

El término polimerización⁴⁰ se refiere a la reacción química o curado, en la cual se añade un catalizador para iniciar el proceso de polimerización. El periodo transcurrido a partir del estado líquido (monómero) hacia un estado sólido (matriz), depende de la

³⁹ Catálogo informativo de la empresa suministradora de barras de basalto " Thermalguard Technology, LLC" facilitada la información el 3/07/14.

⁴⁰ Tesis Doctoral sobre " Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

temperatura de curado, y se denomina tiempo de curado. Tras el curado, el producto resultante alcanza el estado sólido.

Los polímeros se pueden encontrar en estado sólido o líquido; el polímero curado se denomina matriz polimérica. Las matrices poliméricas se clasifican en dos categorías (basándose en la reacción ante calor y frío): termoestables y termoplásticas.

Los polímeros termoplásticos los encontramos en forma sólida, mientras que los termoestables se encuentran en forma líquida.

Termoestables		Termoplásticas	
Ventajas	Inconvenientes	Ventajas	Inconvenientes
-Buena resistencia a fluencia.	-Largo proceso de fabricación.	-Corto proceso de fabricación.	-Baja resistencia a fluencia.
-Buena resistencia química.	-No permite el posformado.	-Posformado.	-Propiedades mecánicas bajas.
-Temperatura máxima de uso elevada.		-Gran tenacidad a fractura.	-Temperatura de uso máxima baja.
-Propiedades mecánicas altas.		-Buena resistencia a deslaminación a fatiga.	

Tabla 12: Desventajas y ventajas de las resinas termoestables y termoplásticas

Algunas matrices poliméricas termoestables son sensibles higrotérmicamente; éstas se pueden degradar a temperaturas moderadas ante la absorción de humedad.

El incremento de la temperatura causa un reblandecimiento gradual de la matriz polimérica hasta un cierto punto, como se puede observar en la figura 20, lo que indica una transición de un comportamiento vítreo a un comportamiento plástico. La temperatura durante la cual se produce esta transición se denomina temperatura de transición vítrea, T_g , la cual disminuye en presencia de humedad.

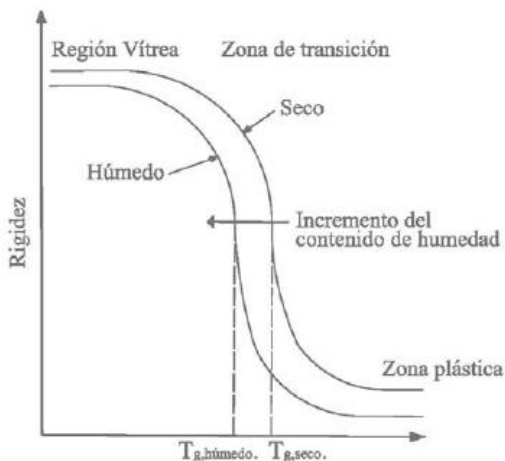


Figura 20: Variación de la T_g y rigidez del polímero en presencia de humedad (Gibson, 1994).

Como resultado, la resistencia a corte y la rigidez de la matriz se reducen, y entonces el material deja de ser efectivo para uso estructural.

Para el sector estructural la resina que más se utiliza es la termoestable, en especial la resina epoxi, y en menor grado la resina vinilester y poliéster.

A continuación voy a analizar las ventajas y desventajas de cada uno de ellos en su interacción con las fibras.

Aunque los tres tipos de resinas son adecuadas para un su uso como matriz polimérica junto con las fibras de basalto, a continuación voy a hablar sobre las propiedades características de cada uno de los tipos de resinas comerciales.

En primer lugar la **resina viniléster** se genera mediante la reacción de un ácido insaturado monofuncional, como el ácido acrílico y una resina epoxi, disuelto igualmente que el poliéster en un monómero de unión como el estireno. Las resinas viniléster presentan ventajas sobre las poliésteres en términos de resistencia química y resistencia a las altas temperaturas .

Son más fáciles de manejar durante el proceso de fabricación que el poliéster o el epoxi y tienen mejor resiliencia que el poliéster.

Presentan mejores comportamiento en ambientes húmedos, y una resistencia interfacial alta y una gran resistencia a los álcalis.

El viniléster se adapta perfectamente a las necesidades de fabricación de los redondos de FRP, debido a su baja viscosidad y corto tiempo de curado, pero como desventajas presentan una mayor contracción volumétrica respecto del epoxi durante el curado y son más caros que las resinas de poliéster. Algunas de las propiedades de la resina viniléster típica se muestran en la tabla 13.

En segundo lugar las principales ventajas de utilizar los **poliésteres** para los FRP son su baja viscosidad, un tiempo de curado rápido, su estabilidad dimensional, una excelente resistencia química y un coste moderado. Al igual que su reducido coste, que llega a ser el 50% de la resina epoxi.

Su principal desventaja es su alta contracción volumétrica durante el proceso de curado.

Por último, la **resina epoxi** tienen una alta resistencia, fuerte adherencia a las fibras, resistencia a ataques químicos y disolvente, buenas propiedades eléctricas, alta temperatura vítrea, baja contracción y emisión de partículas volátiles durante el curado.

	<i>Poliéster</i>	<i>Epoxi</i>	<i>Viniléster</i>
Resistencia a tracción, MPa	20 - 100	55 - 130	70 - 80
Modulo de Elasticidad, GPa	2.1 - 4.1	2.5 - 4.1	3.0 - 3.5
Deformación de ruptura %	1 - 6	1 - 9	3.5 - 5.5
Coefficiente de Poisson	–	0.2 – 0.33	–
Densidad (g/cm³)	1.0 - 1.45	1.1 -1.3	1.1 - 1.3
T_g (°C)	100 - 140	50 - 260	90 - 140
CTE longitudinal (10⁶/°C)	55 - 100	45 - 90	21 - 73
Contracción curado (%)	5 - 12	1 - 5	5.4 – 10.3

Tabla 13: Propiedades físicas y mecánicas de las resinas comerciales

El principal objetivo que se persigue cuando se diseña un material compuesto es conseguir un comportamiento sinérgico de los materiales utilizados. Es decir, que el comportamiento del conjunto formado por los materiales sea superior a la suma del comportamiento de los materiales por separado.

El comportamiento que se pretende optimizar puede ser mecánico, térmico, ignífugo, resistencia química, etc....

Centrándonos en los materiales compuestos de matriz termoplástica con refuerzo de fibra discontinuo y tomando como objetivo optimizar las propiedades termomecánicas, es evidente que la matriz polimérica actúa de “aglomerante” mientras que la fibra es quien proporciona la mayoría de las propiedades mecánicas deseadas.

Sin embargo, los dos componentes del material compuestos deben trabajar de forma conjunta para poder hacer frente a las solicitaciones termomecánicas a las que va a estar sometido el componente fabricado con el material compuesto diseñado.

La resistencia de un material polimérico reforzado depende directamente de la formación de un enlace fuerte entre la fibra y la matriz. En el comportamiento del material compuesto resulta particularmente importante la zona de unión entre las distintas fases que forman el material.

Esta zona de unión, conocida como **interfase**, se convierte en el “tercer factor”, pudiendo tener más importancia relativa que la propia naturaleza de la matriz termoplástica y/o las propiedades mecánicas de la fibra de refuerzo seleccionada.

Aunque cada autor ofrece una definición particular de lo que entiende por “interfase”, el concepto que subyace es siempre el mismo. La definición comúnmente aceptada de lo que es la interfase es “aquella región del material compuesto en el que se concentran las interacciones entre la fibra y la matriz”.

En esta región, se producen complejas interacciones a distintas escalas que dependen de varios factores, como son la naturaleza química de las matrices y de las fibras, las modificaciones compatibilizaciones a las que hayan sido sometidos los materiales que interactúan y de las condiciones específicas de procesado que hayan experimentado durante el proceso de transformación.

Además, el comportamiento de la interfase en cuanto a su forma de transmitir esfuerzos mecánicos entre la matriz y la fibra

depende tanto de la temperatura como de la velocidad de aplicación de la sollicitación mecánica exterior.

En general, la eficiencia de la transferencia de las sollicitaciones mecánicas entre la fibra y la matriz está determinada tanto por la interacción molecular en la interfase como por las propiedades de la interfase formada (estructura, espesor y gradiente de propiedades).

En estas condiciones, para conseguir un buen comportamiento mecánico del material compuesto resultante, es imprescindible fomentar la interacción entre la matriz y el refuerzo mediante diversas técnicas.

Entre estas técnicas destaca la funcionalización de la matriz polimérica y la modificación superficial de la fibra de refuerzo (ensimaje).

En la interfase se pueden distinguir al menos dos zonas claramente diferenciadas.

Por un lado estará la zona en la cual se produce unión química entre el agente compatibilizante y la superficie de la fibra.

Por otro lado habrá una zona de difusión en la cual se encontrarán mezcladas cadenas poliméricas del compatibilizante (simbolizadas por círculos blancos) y las cadenas poliméricas del polímero que forma la matriz del material compuesto (simbolizadas por círculos negros).

4 Propiedades físicas, mecánicas y durabilidad de las barras

En este apartado se desarrollan las propiedades físicas, mecánicas y el comportamiento de durabilidad de las barras de BFRP.

Estas propiedades y comportamiento dependen del volumen de fibra, tipo de fibra de refuerzo y matriz polimérica, orientación de la fibra, proceso de fabricación y control de calidad durante el proceso de fabricación.

El elemento clave en la evaluación de las propiedades de las barras de BFRP es el volumen y masa relativos de los materiales constituyentes. En este proyecto no se ha desarrollado dicho cálculo, pero para su realización, se haría mediante las Ecuaciones. 1.1 a 1.5 (los subíndices c , f y m , se refieren al hormigón, fibra y matriz respectivamente, v representa el volumen, mientras que V representa el volumen relativo. Se emplea la misma denominación para la masa del hormigón m , y la masa relativa M).

$$(1.1) \quad v_c = v_f + v_m$$

$$(1.2) \quad V_f = \frac{v_f}{v_c}, \gamma, V_m = \frac{v_m}{v_c}$$

$$(1.3) \quad V_f + V_m = 1$$

$$(1.4) \quad m_c = m_f + m_m$$

$$(1.5) \quad M_f = \frac{m_f}{m_c}, \gamma, M_m = \frac{m_m}{m_c}$$

Las barras de BFRP están formadas por una matriz polimérica reforzada mediante fibras de basalto longitudinalmente. Esta constitución proporciona la anisotropía característica de las barras de BFRP, la cual influirá en las propiedades y comportamiento de las mismas, proporcionando diferentes propiedades físicas y mecánicas en los dos ejes principales de las barras de BFRP.

La **anisotropía** de las barras de BFRP se debe al predominio de la matriz polimérica en el eje transversal, mientras que en el eje longitudinal predomina el refuerzo de fibra de basalto.

La fibra de basalto en comparación con la fibra de carbono y la fibra de aramida, esta tiene una variedad más amplia de temperaturas de aplicación -269 °C a 650°C, una resistencia a la oxidación mucho más elevada, una resistencia a la radiación mayor, mayor resistencia a la compresión y una resistencia al corte más alta.

Peso

El peso específico del redondo de BFRP es aproximadamente la cuarta parte del redondo de acero (7.85 kg/dm³), dependiendo del porcentaje de fibra y de carga que contenga, variando entre el 2.7 y 3.00 kg/dm³, facilitando su transporte y puesta en obra.⁴¹

Por ejemplo⁴² el n°5 de acero pesa alrededor de 1 libra por pie; mientras que la n°5 del basalto pesa un tercio como mucho y es 2,2

⁴¹Página de Ingeniería Civil y medio ambiente " Mlliarium"

(http://www.miliarium.com/prontuario/tablas/normasmv/tabla_2-1.asp)

⁴² Ficha técnica de barras de basalto proporcionada por la empresa "PPC" Provence Performance Chemical (<http://www.provenperformancechemical.com>)

veces mayor la resistencia a tracción que la del acero. En efecto, el nº3 del basalto (10 mm) puede remplazar a un nº5- serie 60 de acero.

Las barras de basalto son un 12-15% el peso del acero, la recomendación de una empresa (PPC) es utilizar una cuadrícula más estricta de barras de refuerzo de basalto de un diámetro más fino.

Conductividad y dilatación térmica

Las temperaturas de aplicación de FRP están limitados por la temperatura de transición vítrea de la matriz, que es menor a la temperatura de aplicación de las fibras.

De hecho la matriz de refuerzo que une la fibra de carbono al elemento a reforzar siempre está compuesta por morteros epoxicos (mezcla de resinas epoxicas de tres componentes, que da lugar a un mortero autonivelante de alta resistencia) que tienen baja resistencia a altas temperaturas, con el uso de fibras de basalto introducido en mortero cementicio, la matriz de refuerzo puede llegar a resistir temperaturas mucho más elevadas.

El redondo de BFRP es un **no conductor -no magnético**, es decir, no conduce la electricidad, lo que impide la electrólisis, particularmente en estructuras hidráulicas o aplicaciones marinas.

También es no magnético, por lo que se puede utilizar en sala de resonancia magnética y alrededor RFID lectores.

Su coeficiente de dilatación térmica es mejor que el coeficiente del acero, siendo su comportamiento en estructuras de hormigón mejor que el propio acero en las estructuras de hormigón armado convencional.

El coeficiente de expansión térmica longitudinal depende de las propiedades de la fibra, mientras que el transversal está dominado por las de la resina. Los valores típicos de dicho coeficiente en las direcciones longitudinal y transversal, respectivamente, de las barras de FRP, con un contenido de fibras entre el 50% y 70%, se presentan en la Tabla 14.

Tipo de fibra	Peso específico	Resistencia tracción (MPa)	Modulo elasticidad	Deformación unitaria (mm/mm)
Basalto	2,7	400-695 (2800-4800)	12,5-13 (86-90)	0,0315

Tabla 14:Propiedades mecánicas de la fibra de basalto para el diseño de refuerzos estructurales

Propiedades	Fibra de vidrio	Fibra de carbono	Fibra de basalto	Acero
Densidad (g/cm ³)	1.25 - 2.10	1.50 - 1.60	1.90 - 2.10	7.90
Coeficiente de expansión térmica				
Trama	3.3 - 5.60	(-4) - 0	9 - 12	11.70
Urdimbre	11.70 - 12.80	41 - 58	21 - 22	11.70

Tabla 15:Tabla comparativa de diferentes tipos de barras

Trama⁴³: Se ve afectada por el tipo de resina

⁴³ Ficha Técnica sobre barras de basalto de la empresa "Alibaba" visitada el 06/08/14(<http://spanish.alibaba.com/product-gs/basalt-rebar-basalt-fiber-rebar-basalt-fiber-frp-rebar-1634016443.html?s=p>)

Urdimbre: Se ve afectado por las propiedades de la fibra

Es semejante a la fibra de carbono y fibra de vidrio, pero el basalto tiene mejores propiedades físico-mecánicas que la fibra de vidrio, y es significativamente más barato que la fibra de carbono.

Las barras de refuerzo de basalto, es un material ideal avanzado para sustituir el acero y el vidrio de barras de refuerzo.

Módulo de elasticidad

El redondo BFRP presenta un comportamiento linealmente elástico hasta su rotura. Su módulo de elasticidad es mucho menor que el del acero, ya que el del basalto es de 12500-13000 N/mm² y el acero 200 000 N/mm².

A continuación muestro las propiedades tanto, físicas, químicas como térmicas de las fibras de basalto⁴⁴.

Diámetro (mm)	Wt para 40º (lbs)	Resistencia a la cizalladura (MPa)	Resistencia tracción (MPa)	Modulo de tracción (GPa)	Alargamiento a la rotura(%)
8 mm	3.7	201	1200	57	2.24
10 mm	4.85	208	1160	56	1.95
12 mm	9.47	219	1155	55	1.88
16 mm	18.37	225	1120	52	1.31

Tabla 16: Propiedades físicas

⁴⁴ Ficha técnica de barras de basalto proporcionada por la empresa "PPC" Provence Performance Chemical (<http://www.provenperformancechemical.com>)

Las barras son un 80% basalto, 20 % epoxi, Dracon y Sand

SiO₂	53	CaO	8.5	K₂O	1.5
Al₂O₃	17	MgO	4.5	TiO₂	1.4
Fe₂O₃	10	Na₂O	3.3	Other	0.8

Tabla 17:Propiedades químicas

Parámetros	Valores
Temperatura de servicio	270-650°C
Temperatura de reblandecimiento	1050 °C
Conductividad térmica	0.035 W/m°K
Resistencia a la tracción retenida , 200°	95%
Después de la exposición al calor, 400°	82%
Pérdida de peso, hervida 3h, 2N HCl	2.2%
Pérdida de peso, hervida 3h, 2N NaOH	6.0%

Tabla 18:Propiedades Térmicas

Tipo de Fibra	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia a Tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de rotura (%)	C.T.E (10 ⁻⁶ /°C)	Coefficiente de Poisson s
E-Glass	2.500	3.450	72,4	2,4	5	0,22
S-Glass	2.500	4.580	85,5	3,3	2,9	0,22
Vidrio resistente a los álcalis	2.270	1.800-3.500	70-76	2,0-3,0	-	-
ECR	2.620	3.500	80,5	4,6	6	0,22
Carbono (Módulo alto)	1.950	2.500-4.000	350-650	0,5	-1,2...-0,1	0,20
Carbono (Alta resistencia)	1.750	3.500	240	1,1	-0,6...-0,2	0,20
Aramida (Kevlar 29)	1.440	2.760	62	4,4	-2,0 Longitudinal 59 Radial	0,35
Aramida (Kevlar 49)	1.440	3.620	124	2,2	-2,0 Longitudinal 59 Radial	0,35
Aramida (Kevlar 149)	1.440	3.450	175	1,4	-2,0 Longitudinal 59 Radial	0,35
Aramida (Technora H)	1.390	3.000	70	4,4	-6,0 Longitudinal 59 Radial	0,35
Aramida (SVM)	1.430	3.800-4.200	130	3,5	-	-
Basalto	2.800	4.840	89	3,1	8	-

Tabla 19: Propiedades de las fibras de refuerzo de barras de FRP. Adaptado de FIB Task Group 9.3

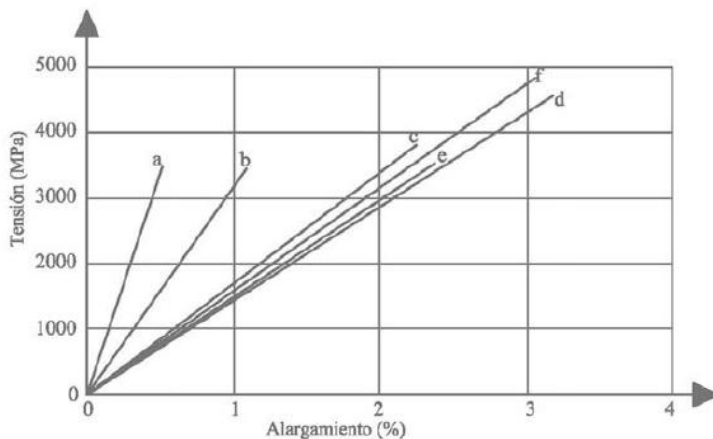


Figura 21: Gráfica de tensión/deformación de diferentes tipos de fibras: a) Carbono (alto módulo); b) Carbono (alta resistencia); c) Aramida; d) S-glass; e) E-Glass; f) Basalto. Adaptado de FIB., 2007.

Módulo de tracción

El basalto es fuerte tanto en tracción como en compresión, eso hace que no pueda ser doblado o deformado con la misma facilidad que el acero.

Este material, el basalto, proporciona una resistencia más de dos veces la del acero.

El basalto en barras de refuerzo tiene el mismo coeficiente de expansión térmica que el hormigón.

Resistencia a la corrosión

El basalto no se oxida ni absorbe agua, por lo que la profundidad de recubrimiento de hormigón se puede reducir. Esto permite secciones más estrechas y una mayor flexibilidad en el diseño.

Flexión

El comportamiento a flexión⁴⁵ del hormigón armado con FRP es lo más ensayado y estudiado, con principios básicos aplicados independientemente de la configuración del elemento, de la geometría del refuerzo o del tipo de material (carbón, vidrio, basalto o aramida).

Existen dos modos de fallo a flexión posibles en un elemento de hormigón armado con FRP. Las secciones con cantidades pequeñas de armado fallan por la ruptura a tracción del redondo de FRP, mientras que las que tienen grandes cantidades, colapsan antes por el aplastamiento de la cabeza de compresión del hormigón, sin que la armadura a tracción haya alcanzado su tensión de rotura.

Deformaciones y fisuras

Ante una misma capacidad resistente de la armadura utilizada en una viga, ya sea de basalto o de acero, las deformaciones y los anchos de las fisuras son normalmente más grandes en vigas y losas de hormigón armado con FRP, que en elementos con armadura convencional, debido al menor módulo de elasticidad de dichos FRP.

De tal forma que los límites de las deformaciones o del ancho de fisura son los que con frecuencia controlan el diseño y suelen ser satisfechos utilizando secciones sobredimensionadas.

⁴⁵ Tesis Doctoral sobre "Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP" autora: Almerich Chulia, Ana Isabel del año 2010.

<i>Ventajas de refuerzo de FRP</i>	<i>Desventajas de refuerzo de FRP</i>
Alta resistencia a la tracción longitudinal (varía con el signo y dirección de la carga en relación con la dirección las fibras)	No plastifica antes de la rotura frágil
Resistencia a la corrosión (no depende del recubrimiento)	Baja resistencia transversal (varía con el signo y la dirección de la carga en relación con dirección de las fibras)
No magnético	Bajo modulo de elasticidad (varía con el tipo de refuerzo de fibra)
Alta resistencia fatiga (varía con el tipo de refuerzo de fibra)	Posible daño de las resinas poliméricas y las fibras bajo exposición a la radiación ultravioleta
Ligero (aproximadamente 1/5 a 1/4 de la densidad de acero)	Baja durabilidad de las fibras de vidrio en ambientes húmedos
Baja conductividad térmica y eléctrica (para fibras de vidrio y de aramida)	Baja durabilidad de algunas fibras de vidrio y de aramida en medios alcalinos.
	Alto coeficiente de expansión térmica perpendicular de las fibras, en relación con el hormigón
	Susceptible al fuego, dependiendo del tipo de matriz y del espesor del recubrimiento de hormigón

Tabla 20: Ventajas y desventajas de refuerzo de FRP

5 Adherencia entre hormigón - BFRP

Los elementos de hormigón armado con barras de BFRP actúan dependiendo de las propiedades del hormigón, de las barras de BFRP y de la adherencia barra/hormigón.

Es por ello, que el comportamiento de la estructura frente a estado límite último (flexión, cortante, torsión, etc..) dependerá en gran medida de la capacidad de desarrollar una adecuada adherencia entre la barra y el hormigón. A su vez, el comportamiento en condiciones de servicio, tales como deformación y fisuración, dependerá de la rigidez a tracción.

En el caso de estructuras de hormigón pretensado, su comportamiento, ya sea en condiciones de estado límite último o servicio, también depende de la adherencia barra/hormigón.

Por lo tanto, el comportamiento global de las estructuras de hormigón armado con barras de BFRP, está condicionado por el comportamiento adherente entre las barras de BFRP y el hormigón, y este comportamiento adherente a lo largo de la vida de servicio de la estructura, será un índice razonable de predicción del comportamiento a largo plazo de la estructura.

La mayor parte de las normas de diseño de estructuras de hormigón armado con FRP han sido desarrolladas a partir de las guías de diseño de estructuras de hormigón armado con acero. Sin embargo, algunos estudios experimentales han demostrado que las propiedades del comportamiento físico y mecánico de las barras de FRP son cualitativamente y cuantitativamente diferentes al desarrollado por el armado de acero.

Estas diferencias aparecen a causa de las variaciones en las propiedades de los materiales, y por cambios en los mecanismos de interacción entre el hormigón y las barras de FRP. Sin embargo, los diferentes órganos o comités normativos han optado por métodos de diseño de estructuras con armado de FRP's, en métodos de diseño de estructuras con armado de acero.

Por lo tanto, los métodos de cálculo de la tensión adherente media desarrollada entre el hormigón y las barras de BFRP, están desarrollados a partir de los métodos empleados en elementos con armado de acero.

Capítulo 3.

Programa experimental y Resultados

1 Introducción

En este capítulo se va a analizar el programa experimental que se desarrollaría, con la finalidad de estudiar las propiedades positivas del basalto frente al acero, para su novedosa utilización de este material en el ámbito de la construcción.

Para poder realizar los ensayos de pull-out es necesario determinar con anterioridad las propiedades geométricas y mecánicas de este tipo de barras ⁴⁶. Es por ello que se realizan los ensayos experimentales preliminares de diámetro equivalente, estudio de la geometría superficial y tracción longitudinal.

Del mismo modo, para llevar a cabo los ensayos de pull-out y preliminares, es necesario realizar ensayos previos para definir parámetros, como son la longitud de anclaje de las barras de BFRP y el tipo de material de agarre de los anclajes.

⁴⁶ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

2 Material empleado

Los materiales seleccionados en este proyecto son barras de BFRP con diferentes tipos de geometrías superficiales y diámetros. Al mismo tiempo, con el objetivo de establecer una comparación del comportamiento adherente, se emplean barras de acero corrugadas con diámetros similares a las barras de BFRP.

2.1 Barras de basalto

El material que se ha utilizado para la realización de los trabajos experimentales en laboratorios y/o entidades externas, del cual obtenemos las propiedades y características que se están analizando en el presente estudio, es barras de FRP (como se puede observar en las Figuras 23 y 24) fabricadas mediante la utilización de fibras de basalto continuas.

La característica más interesante de este tipo de producto es la de permitir una mejor adherencia con el hormigón, a causa de estar dotada dicha barra de las vueltas de la malla helicoidal proporcionadas por las fibras, que crean una nervadura en relieve continuo por encima de la barra de apoyo. Estas barras tendrán sus diámetros, geometrías, ect. que el fabricante proporcionará, según empresa, laboratorio, etc.

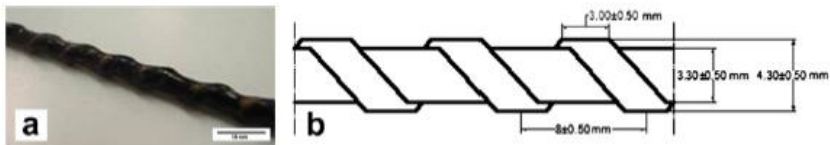


Figura 22: Barra de basalto



Figura 24: Barras de basalto



Figura 23: Fibras de basalto en barras corrugadas

2.2 Barras de acero

Por otra parte también se han utilizado barras de acero para la realización de los ensayos en las diferentes entidades y laboratorios de los cuales obtengo la información analizada en el presente estudio, para poder realizar la comparación de las propiedades y características, que es el objeto de mi proyecto.

Este material no está dotado de fibras que le den el relieve continuo, anteriormente comentado, pero si están recubiertos superficialmente por una serie de pequeñas corrugas que le dan la característica de adherencia con el hormigón.



Figura 25: Barras corrugadas de acero

3 Ensayos previos

En este apartado se muestran los ensayos previos necesarios para realizar los ensayos experimentales de tracción y pull-out, dichos ensayos se realizaran de acuerdo con la normativa vigente ACI 440.3R-04 .

3.1 Cálculo de la longitud mínima de los anclajes.

Investigaciones anteriores y las pruebas preliminares⁴⁷, han indicado que, tirar directamente de la barra mediante una maquina de ensayo de tracción (Figura 30) es bastante complicado, ya que produciría un fallo de aplastamiento en los extremos de la barra a causa de estar esta formada por fibras, por tanto se ha demostrado que es necesario un sistema de anclaje.

⁴⁷ Ficha técnica de barras de basalto proporcionada por la empresa "PPC" Provence Performance Chemical (<http://www.provenperformancechemical.com>)

Las barras de FRP necesitan disponer de un sistema de anclaje en cada uno de los extremos para la transmisión de las tensiones de la máquina de ensayo a la barra, tanto en el ensayo de tracción como de pull-out.

Esto se produce por la reducida resistencia a cortante de este tipo de barras.

Sin este tipo de anclaje se produciría una rotura prematura por cortadura de la sección en los extremos anclados, y por consiguiente no desarrollaría dicha barra toda su capacidad tensional.

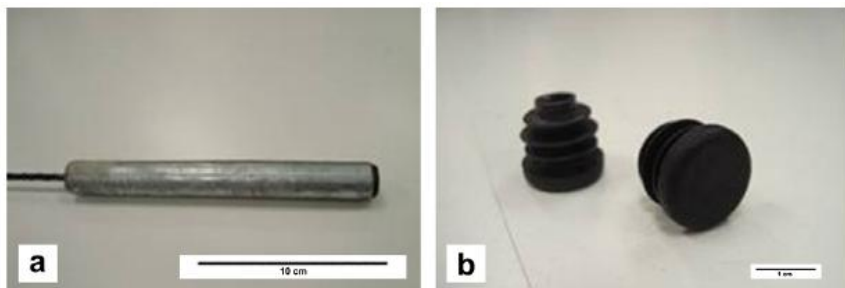


Figura 26: a) Sistema de anclaje, y b) tapas de plástico utilizado

Para obtener unos resultados fiables del ensayo es importante tener en cuenta el diseño de la barra y la buena realización del anclaje, ya que una mala alineación de dicho anclaje podría dar lugar a un fallo no deseado ni previsto anteriormente.

Se determina como anclaje en barras de basalto de 150 mm, como indico en la figura 27 y figura 28, mediante el cual la barra puede ofrecer una contención adecuada.

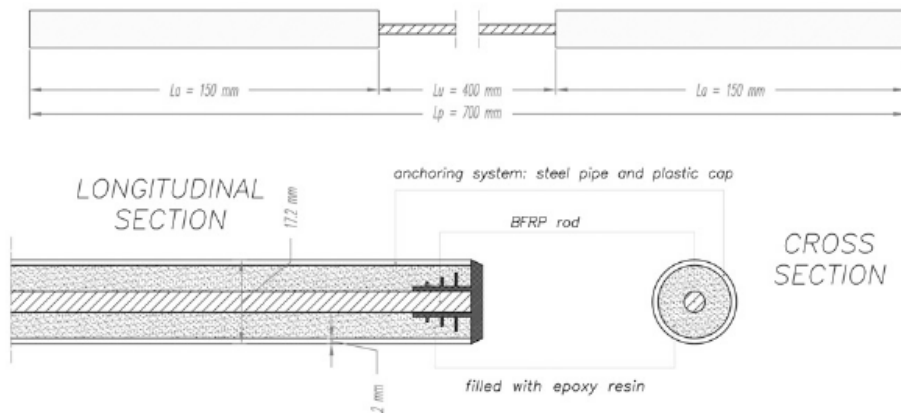


Figura 27: Dimensiones y detalles del sistema de anclaje de varillas de BFRP⁴⁸

La dimensión de la longitud de anclaje dependerá del comportamiento adherente de la barra de FRP empleada como armado y se determina mediante la siguiente ecuación:⁴⁹

$$l_d = \alpha_1 \frac{f_d}{4 \cdot f_{bod}} \cdot \phi \quad (\text{Ec. 1.6})$$

⁴⁸ Ficha técnica de barras de basalto proporcionada por la empresa "PPC" Provence Performance Chemical (<http://www.provenperformancechemical.com>)

⁴⁹ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

Donde :

l_d , es la longitud básica de anclaje, en mm.

\emptyset , es el diámetro del armado, en mm.

f_d , es la resistencia a tracción del armado, en MPa.

α_1 presenta los siguientes valores: 1,0, 0,9, 0,8, 0,7 y 0,6, para $kc \leq 1,0$, $1,0 < kc \leq 1,5$, $1,5 < kc \leq 2,0$, $2,0 < kc \leq 2,5$ y $2,5 < kc$, respectivamente.

Donde:

$$K_c = \left(\frac{c}{\emptyset}\right) + \left[\left(\frac{15 \cdot At}{s \cdot \emptyset}\right) \cdot \left(\frac{E_t}{E_0}\right)\right] \quad (\text{Ec. 1.7})$$

en donde:

c: es el menor recubrimiento de hormigón, en mm

At: es el área transversal del armado, en mm

s: es el espaciamiento entre barras, en mm

E_t: es el módulo de elasticidad del armado, en MPa

E₀: es el módulo de elasticidad del acero, en MPa

f_{bod}: es la tensión adherente de la barra de FRP, en N/mm²

calculada a continuación:

$$f_{bod} = \frac{0,28 \cdot \alpha_2 \cdot \sqrt[3]{f'_{ck}}^2}{\gamma_c} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Donde:

f_{bod}, debe ser menor o igual a 3,2 N/mm². **α_2** , es un coeficiente modificador que depende de la adherencia del armado, cuyo valor será igual a 1 si el comportamiento adherente es similar o mejor que el de las barras de acero corrugadas. Para diferente comportamiento adherente, este coeficiente modificador debe ser calculado de acuerdo con los ensayos normalizados (JSCE E-539).

Aunque la longitud de adherencia también se puede determinar, según otro artículo de la siguiente manera:⁵⁰

$$l_T > 40\varnothing + 2l_a$$

en donde:

\varnothing : diámetro de la barra y

l_a : longitud de anclaje.

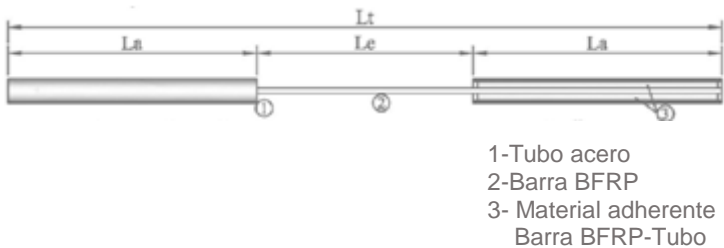


Figura 28: Longitudes de anclaje de barras FRP

⁵⁰ Norma Italiana sobre " Istruzioni per la progettazione l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armato con barre di materiale composito fibrorinforzato"(http://www.cnr.it/documenti/norme/IstruzioniCNR_DT203_2006.pdf)

4 Ensayos experimentales

4.1 Ensayos preliminares

El ensayo de **tracción**⁵¹ ⁵² se realiza siguiendo las disposiciones de la normativa ACI 440.3R-04 B.2 "Test method for longitudinal tensile properties of FRP bars".

Con este método se calcula la fuerza " F_u ", tensión resistente " f_u ", el módulo elástico " E_L " y el alargamiento " ϵ " para cada nivel tensional y " ϵ_u " bajo carga máxima de las barras de BFRP y acero.

En el caso de las barras de acero corrugadas también se emplea la norma UNE-EN ISO 15630-1 para el cálculo del límite elástico " f_{LE} ", del alargamiento a límite elástico " ϵ_E " y del alargamiento de rotura " ϵ_r ".

La maquinaria empleada para la realización de este ensayo es: Por una parte tendremos un captador de deformación (figura 29) que es el extensómetro de pinzas, también tenemos la máquina determinada para el ensayo (figura 32)⁵² y por otra parte un sistema de ordenador electrónico, el cual se utiliza para introducir los parámetros de la muestra, colocar el control de velocidad del ensayo

⁵¹ Ficha técnica de barras de basalto proporcionada por la empresa "PPC" Provence Performance Chemical (<http://www.provenperformancechemical.com>)

⁵² Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

deseada y este automáticamente calculará las estadísticas y resultados deseados, y, finalmente, se producirá un informe de la prueba, que son los informes y fichas que estoy analizando en el presente estudio.



Figura 30: Máquina de ensayo a tracción



Figura 29: Captador de deformaciones

Para la realización del ensayo de tracción⁵³ de las barras de refuerzo BFRP compuesto, es de gran importancia que las barras se preparen con pestañas en los extremos de la barra, con el fin de garantizar una sujeción adecuada de la muestra, por tanto hacer función de mecanismo de protección, como bien hemos indicado anteriormente.

⁵³ Página web empresa "Instron", información sobre soluciones para ensayos (<http://www.instron.com.es/wa/solutions/Tensile-Strength-of-Basalt-Fiber-Reinfor.aspx>) visitada 22/06/14

Esto garantiza que se produzcan roturas de la barras dentro de la longitud de calibre y no dentro de la cara de la mordaza, como mostramos en la figura 31.



Figura 31: Pestañas de sujeción de los extremos de la barra

El **procedimiento** a seguir en dicho ensayo es el siguiente:

En primer lugar se cogerá las pruebas que se han determinado para dicho ensayo (de diferente diámetro) y mediante una sierra eléctrica con disco, se cortarán las barras determinadas para el ensayo con la longitud de anclaje determinada en el apartado 3.3.1.

A continuación se realizará la fabricación de la resina a utilizar en el presente ensayo de la manera que se haya previsto y acordado anteriormente y luego se realizará la preparación de los anclajes de las barras de BFRP en unas ciertas condiciones de laboratorio, que se anotarán como dato a tener en cuenta.

Seguidamente, se verterá la resina en el interior del tubo que posee la barra de BFR con un tapón en la parte inferior.

Dichos tapones de plástico estarán dotados de agujeros ligeramente más grandes que el diámetro de las barras utilizadas para cerrar los extremos de los tubos y para mantener la barra en el centro del tubo, como se ha visto en la Figura 26 b).

Mediante un vibrador eléctrico se vibrará el anclaje para distribuir homogéneamente la resina por todo el tubo y evitar posibles oclusiones de aire.

A continuación se colocará el tapón en la parte superior del tubo, evitando el derrame de resina de epoxi y alineando de este modo la barra en los tubos de anclaje.

Se utilizara un encofrado de madera para mantener la barra y el tubo verticalmente alineados durante el fraguado de la resina, como se observa a continuación en la figura 32.

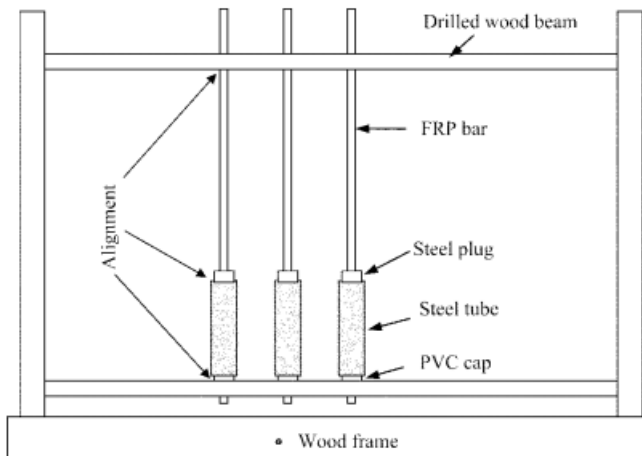


Figura 32: Encofrado de madera para dar verticalidad mediante el fraguado de la resina

Después del curado de la resina de epoxi durante 48 horas en condiciones de laboratorio, temperatura y humedad constante, la resina epoxi de uno de los extremos estará endurecida, por tanto se podrá dar la vuelta a la muestra teniendo el siguiente extremo ya preparado y pudiendo así repetir el procedimiento anteriormente descrito.

Debido a que ACI 440.3R-04 no establece una velocidad específica de ensayo (tan solo establece que la muestra debe de romper de 1 a 10 min). La velocidad de ensayo de cada tipo de barra se calculará a partir de la norma JSCE 1997(b), que en su disposición JSCE-E 531-1995 "Test method for tensile properties of continuous fiber reinforcing materials".

Una vez realizados los ensayos obtendríamos los siguientes resultados:

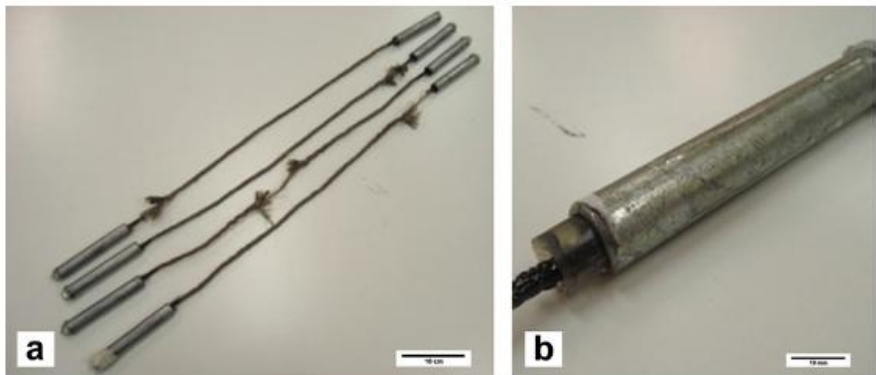


Figura 33: Las muestras después de la prueba de tracción (A) y muestra de fallo del sistema de anclaje (B).

El cálculo de la tensión y módulo elástico de cada barra se realiza mediante las siguientes formulas:

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (\text{Ec.1.9})$$

$$E_L = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)A} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

f_u es la tensión máxima (MPa)

F_u es la fuerza máxima (N)

A es el área de la sección resistente de la barra (mm²)

F_1 y F_2 es la fuerza aplicada al 20 y 50% de la fuerza máxima F_u

(N) y ε_1 y ε_2 son los alargamientos correspondientes al 20 y 50% del alargamiento a carga máxima, adimensional.

Los resultados del ensayo de tracción, por los resultados que se han analizado de diferentes artículos, se prevé que:

Las barras de BFRP poseen un modo de rotura frágil, en el cual la barra rompe repentinamente por splitting de la sección resistente, en cambio, las barras de acero corrugadas poseen un modo de rotura dúctil ocasionado por el agotamiento de la sección resistente.

A continuación podemos ver los resultados que obtuvieron en un ensayo de tracción, en el cual se puede observar que el comportamiento de las barras de BFRP es elástico-lineal hasta la rotura, por el contrario, las barras de acero corrugadas ensayadas a tracción poseen un comportamiento elasto-plástico, como se puede observar en la siguiente grafica (Figura 34).

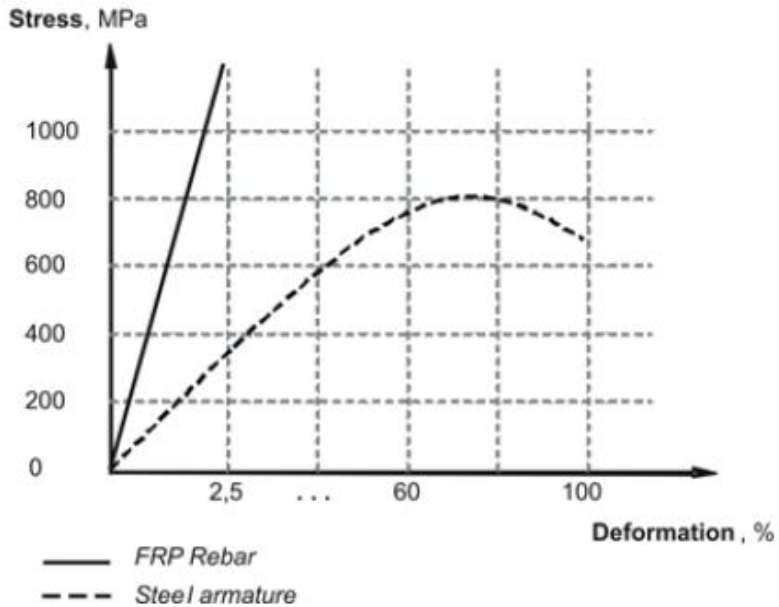


Figura34: Gráfica de los resultados del ensayo a tracción⁵⁴

⁵⁴ Catálogo informativo de la empresa suministradora de barras de basalto " Thermalguard Technology, LLC" facilitada la información el 3/07/14.

The properties of Steel, Glass Rod & Basalt Fiber Rebar

Item	Steel	Basalt rebar (BFRP)
Tensile strength (MPa)	350-650	700-1300
Yield strength (MPa)	280-420	-
Compressive strength (MPa)	350-650	450-550
Tensile elastic modulus (GPa)	200	45-65
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Lengthwise	11.7
	Transverse	11.7

Tabla 21: Resultados del ensayo a tracción⁵³

Por último se calculará⁵⁵, después de obtener los resultados del ensayo, la tensión " $f_{u,ck}$ " y alargamiento bajo carga máxima " $\epsilon_{u,ck}$ " característicos, mediante las ecuaciones siguientes que se basan en las normas ACI 440.1R-06 y ACI 440.6M-08, (nivel de confianza del 99,87%), mientras que para el cálculo del módulo elástico característico " $E_{L,ck}$ " define que este es igual al módulo elástico medio EL calculado o definido por el fabricante.

Respecto a los valores característicos de las barras de acero, estos se calculan mediante las disposiciones definidas por UNE-EN 10080 (con un nivel de confianza del 95%).

$$f_{u,ck} = (f_u - (3 \cdot \sigma)) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

⁵⁵ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

$$\varepsilon_{u,ck} = (\varepsilon_u - (3 \cdot \sigma)) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Una vez analizados los valores del ensayo de tracción, se va a considerar que para el cálculo de la deformación en el extremo tensionado de cada probeta de ensayo a pull-out se emplearán o los valores del E_L de cada tipo de barra obtenidos en el ensayo de tracción o el módulo elástico definido por el fabricante de este tipo de barras, según el tipo de barra.

4.2 Ensayos pull-out

El ensayo “pull-out”⁵⁶ es en el cual se intenta medir con precisión la fuerza necesaria para arrancar una única fibra parcialmente embebida en una gota hemiesférica de matriz polimérica. El ensayo de “pull-out” se ha convertido, a pesar de su complejidad y discutible repetitividad, en un ensayo de referencia.

Diferentes versiones de este ensayo han sido utilizadas para caracterizar la adherencia interfacial en el diseño de materiales compuestos.

Las diferentes normativas de diseño de estructuras de hormigón armado con barras de FRP (ACI 440.1R-06, JSCE 1997(b), CAN/CSA-S806-02, CNRDT 203/2006) recomiendan en sus artículos el

⁵⁶ Normativa ACI 440.3R-04 " Guide test methods fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures " (http://www.radyab.co/content/media/article/4403R_04_0.pdf)

ensayo de pullout centrado, para la determinación del comportamiento adherente.

Sin embargo, debido a que estas Instrucciones comenzaron a recoger los métodos de ensayo de adherencia a partir de finales de la década de los 90 y a su vez estos métodos son recomendables y no obligatorios.

Hay dos tipos de ensayos de pull out : El pull-out centrado y el pull-out descentrado o pull-out con confinamiento.

El ensayo de pull-out centrado se emplea para el cálculo comportamiento adherente entre la barra de FRP y el hormigón, mediante la determinación de la gráfica que relaciona la tensión adherente y el deslizamiento relativo de la barra (gráfica 'T-S').

La acción de confinamiento del hormigón circundante a la barra debe ser tal, que evite la rotura de la probeta por splitting del hormigón.

La norma ACI.440.3R-04 establece una dimensión de probetas de forma cúbica de 200 mm de lado , mientras que la JSCE 1997(b) establece dependiendo el diámetro de la barra unas dimensiones de 100 mm y 150 mm de lado para barras de 8-10 mm y 12-15 mm, respectivamente, como bien podemos observar en la figura 37.

La longitud adherente debe ser tal, que permita que la tensión adherente sea distribuida en todos los estados de carga. Para ello, ACI.440.3R-04 recomienda una longitud adherente de 5 diámetros de la barra, y JSCE 1997(b) 4 veces el diámetro de la barra.

La tensión adherente máxima obtenida mediante este ensayo es la mayor posible de todos los ensayos de pull-out sin confinamiento.

La dirección de vertido del hormigón en la probeta varía dependiendo de la normativa escogida, así ACI.440.3R-04 establece el vertido del hormigón en la dirección del eje longitudinal de la barra como podemos observar en la figura 35, mientras que JSCE 1997(b) al igual que la UNE lo realiza perpendicularmente al eje longitudinal de la barra.

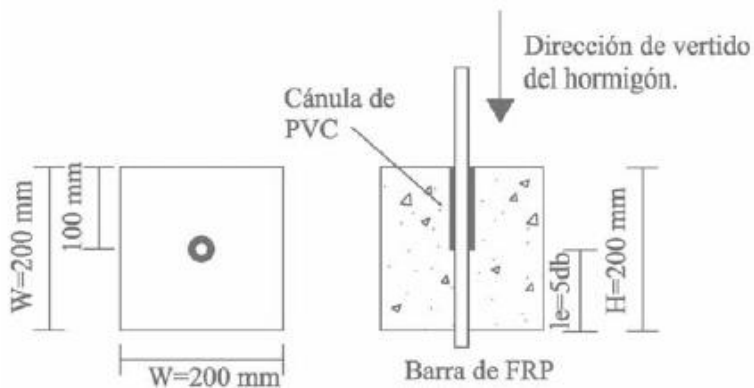


Figura 35: Dimensiones y características de las probetas para el ensayo de adherencia por pullout centrado. ACI.440.3R-04.

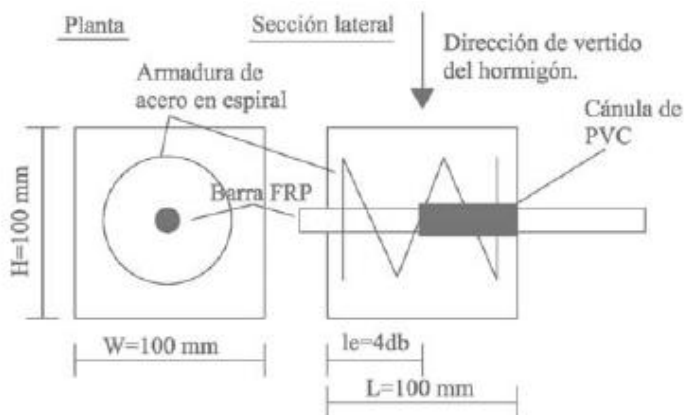


Figura 36: Dimensiones y características de las probetas para el ensayo de adherencia por pull-out centrado. JSCE 1997(b).

Del mismo modo, ACI.440.3R-04 también recoge el vertido del hormigón perpendicular al eje longitudinal de la barra para el tipo de ensayo de pull-out centrado, como podemos observar en la figura 36, que calcula la influencia de la posición de la barra .

Otra diferencia sustancial entre los métodos propuestos por las normativas, se debe a que JSCE 1997(b) introduce un armado de confinamiento helicoidal en la probeta de pull-out.

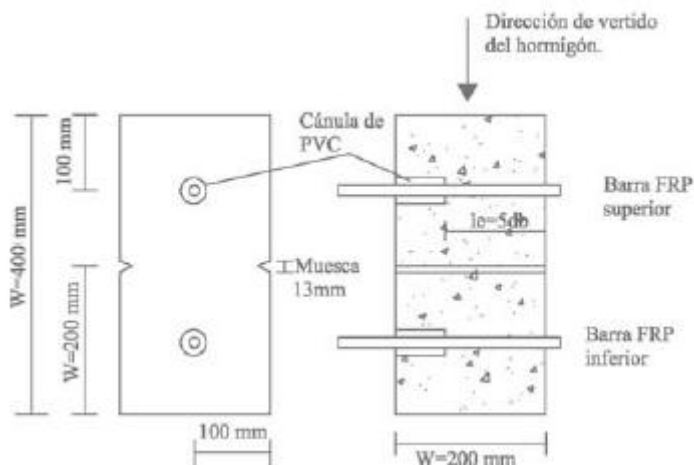


Figura 37: Dimensiones y características de las probetas para el ensayo de adherencia por pull-out centrado, con la influencia de la posición de la barra. ACI.440.3R-04.

Otra de las diferencias es la velocidad de aplicación de carga, la cual en ACI es no mayor a 20 kN/min, superior a la establecida por UNE de $0,56 \cdot \phi^2$; y por otra parte la captación de deformaciones donde ACI establece la captación en ambos extremos y UNE tan solo en el extremo no tensionado.

Este ensayo consiste en aplicar una fuerza de tracción en el extremo de una barra que se encuentra embebida en el extremo contrario en una probeta de hormigón cúbica con unas dimensiones determinadas (mm).

La longitud adherente entre la barra y el hormigón es de 5 diámetros de barra, como bien hemos dicho anteriormente, por lo que en la longitud restante se coloca un tubo de PVC para evitar el contacto

entre el hormigón y la barra. Este método define que el tubo de PVC debe colocarse anteriormente a la longitud adherente de la barra, para de esta forma evitar el confinamiento del hormigón sobre la barra, que incrementaría la tensión adherente.

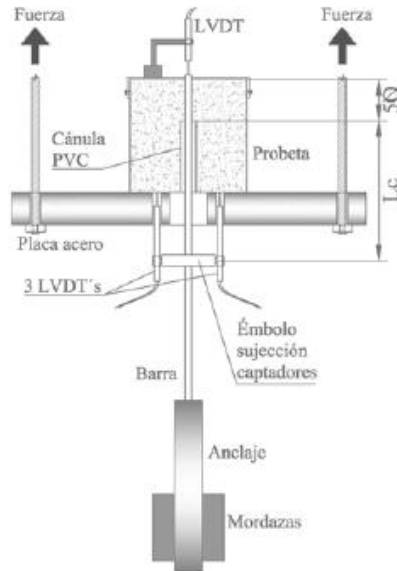


Figura 38: Metodología del ensayo de pullout

Este tipo de ensayo se compone de una camisa de acero cilíndrica que confina la probeta de hormigón. La altura de la probeta de pull-out es igual a la longitud de anclaje de la barra de FRP.

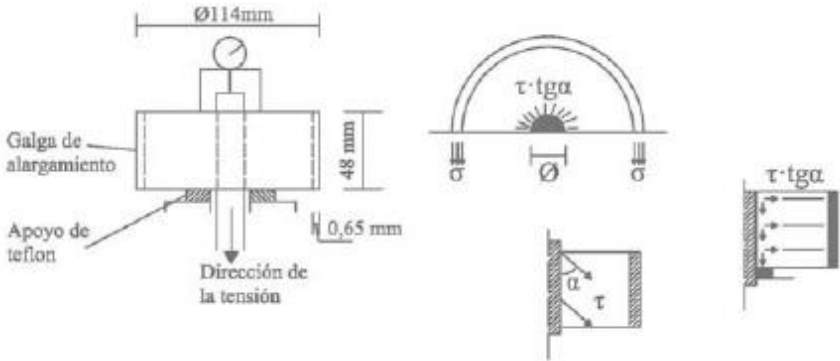


Figura 39: Dimensiones y características de las probetas para el ensayo de adherencia por pull-out con confinamiento. Tefers et al.,1992.

Mediante el ensayo anteriormente descrito lo que se pretende calcular es por una parte la tensión adherente “ τ ” y por otra parte los deslizamientos en el extremo tensionado “ δ_{ET} ” y no tensionado “ δ_{ENT} ” de la barra, obteniendo de este modo la relación tensión adherente/deformación.

El cálculo de δ_{ENT} se obtiene directamente del LVDT instalado en el extremo no tensionado de la barra, sin embargo, para el cálculo de δ_{ET} hay que restar a la deformación media de los tres captadores instalados en el extremo no tensionado la deformación elástica de la barra “ S_c ” como bien se indica en las ecuaciones siguientes(Ec. 2.4 y Ec.2.5)

$$\tau = \frac{F}{C_b \cdot l_a} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$S_c = \frac{F \cdot L_c}{E_L \cdot A} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

F es la fuerza aplicada (en N)

C_b es el perímetro de la barra (en mm)

l_a es la longitud adherente de la barra (en mm)

L_c es la longitud entre el punto medio de sujeción de los captadores del extremo tensionado hasta el inicio de

E_L, es el módulo elástico de la barra (en MPa)

A es el área resistente de la barra (en mm²)

Para llevar a cabo los cálculos de τ y δ_{ET} , anteriormente se habrán calculado según las disposiciones de ACI.440.3R-04. B.3. los siguientes parámetros:

- El diámetro, área y perímetro equivalente siguiendo la norma ACI. 440.3R-04. B.1 .
- Área resistente.
- Módulo elástico, según la norma ACI.440.3R-04. B.2.

En cuanto a la condición ambiental del laboratorio donde se realiza el ensayo de pull-out es a 23 ± 3 °C y $50 \pm 10\%$ de humedad relativa según la norma ACI.440.3R-04- B.3 solo recoge esta condición ambiental de ensayo.

En cuanto al hormigón que se emplea en los ensayos de pull-out, hay que decir que, se ha dosificado un hormigón de resistencia a compresión media " f_c " = 30 ± 3 MPa y un tamaño máximo de árido de 12,5 mm, siguiendo lo estipulado en la norma de ACI.440.3R-04.

La toma de muestras de cada lote se ha realizado conforme a UNE-EN 12350-1, la forma y medidas de las probetas y los moldes según UNEEN 12390-1, la fabricación y curado de probetas de acuerdo a UNE-

EN 12390- 2, la determinación de la resistencia a compresión conforme a UNE-EN 12390-3 y la determinación de la consistencia de cada amasada según UNE-EN 12350-2.

Por lo tanto, la resistencia media y característica de cada lote se calcula mediante las disposiciones del art. 86.3.2 de la EHE-08, con la ecuación siguiente (Ec.2.6):

$$f_c = \lambda_{\text{cil,cub}} \cdot f_{c,\text{cubica}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

f_c es la resistencia a compresión del hormigón referida a probeta cilíndrica de 150 x 300 mm (en MPa).

$\lambda_{\text{cil,cub}}$, es el coeficiente de conversión obtenido de la Tabla 86.3.3.a de la EHE-08.

$f_{c,\text{cubica}}$ es la resistencia de la probeta cúbica (en MPa).

A continuación se va a citar el **material** empleado para este tipo de ensayo de pull-out:

- Barras corrugadas de BFRP y de acero, con las características geométricas y mecánicas acordadas anteriormente al ensayo.
- Anclajes de barra de acero electrosoldado de 300 mm y material adherente entre barra y tubo base a base de material polimérico (resina epoxi).
- Tubo de PVC
- Moldes probetas de pull-out conforme a ACI.440.3R-04 y UNE-EN 12390-1. Con este clase de moldes no es necesario el pulido o refrentado de la cara de la probeta en contacto con la placa

de ensayo debido a que la cara donde se encuentra la barra corresponde a una de las caras del molde.

- Para el empleo de este tipo de moldes se utilizan unos tapones de goma para cada tipo y diámetro de barra.
- Émbolo metálico para sujeción de 3 LVDT en el extremo tensionado.
- 3 LVDT.
- Placa metálica de sujeción del LVDT en el extremo no tensionado.
- Placa de acero de 50 mm de espesor para sujeción de probetas durante el ensayo de pull-out.
- Cámara climática para curado de probetas a 20 ± 2 °C y H.R. > 95 % .
- Prensa de ensayo de pull-out, que aplicará una cierta carga, y esta dispondrá de una adaptación de la placa de sujeción diseñada.
- La lectura de los LVDT se realiza mediante un sistema determinado.
- Prensa de ensayo a compresión del hormigón con una cierta fuerza de aplicación.

El **procedimiento**⁵⁷ a seguir en dicho ensayo es el siguiente:

En primer lugar, selección de las barras necesarias para realizar el ensayo y realización del corte de estas a una longitud de 750 mm.

A continuación, preparación de las barras, es decir, colocación del tubo de PVC que define la longitud adherente.

Seguidamente realizaremos la disposición de cada tipo de barra en los moldes de pullout, en el orden establecido anterior al ensayo, y también realizamos la colocación de tapones y aceite desencofrante en cada uno de los moldes.



Figura 40: Preparación de moldes y barras para vertido de hormigón: tubos PVC y tapones

⁵⁷ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

Debido a que la resistencia del hormigón es un parámetro influyente en el comportamiento adherente, se realizan ensayos de control de resistencia a compresión del hormigón en cada amasada o lote de pull-out.

Una vez preparados los moldes, realizaremos la fabricación del hormigón que vamos a utilizar para el ensayo de pull-out, de f_c igual a 30 MPa.

Se hará un ensayo de consistencia y posterior vertido de hormigón en los moldes de pull-out preparados y realización de probetas de control del hormigón a compresión según las disposiciones de cada normativa anteriormente citadas.



Figura 41: Preparación de las probetas de pull-out⁵⁸

⁵⁸ Tesis Doctoral sobre "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el

La compactación de las probetas de pull-out y compresión se realizara mediante vibrador eléctrico.

Después de pasadas 24 h de la fabricación del hormigón se desmoldan y marcan las probetas de pull-out y control del hormigón.

Una vez marcadas las probetas y hacerle el control debido, estas se introducen en la cámara de curado a una temperatura de 20 ± 2 °C y H.R. > 95 % de H.R.

A los 26 días se extraen las probetas de pull-out de la cámara y se les realiza el sistema de anclaje de las barras de BFRP, definido dicho anclaje en el apartado 3.3.1.



Figura 42: Preparación de los anclajes de las probetas para el ensayo de pull-out

hormigón" el autor: Calvet Rodríguez, Víctor; los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá; publicada en Valencia, el Febrero de 2014

Una vez realizados dichos anclajes estos se mantienen durante 48 h, para que la resina epoxi fragüe (curado de la resina en los anclajes) a una temperatura controlada.

Pasados los 28 días, estas probetas se ensayaran mediante un control a compresión del hormigón y se preparan las probetas de pull-out.



Figura 43: Ensayo a compresión del hormigón

A continuación se procede a la realización de los ensayos de pull-out de las probetas, con una velocidad determinada y que se anotará para su consideración en los resultados del ensayo.



Figura 44: Ensayo de pull-out

A continuación, una vez se hayan realizado los ensayos de pull-out, estas probetas se romperán por la mitad ,para con ello poder medir el diámetro resultante de cada probeta que se haya realizado, mediante un calibre.

Por ultimo dicho calibre dará imágenes tanto de la longitud adherente de las barras, la zona adherente de la probeta por medio del hormigón, etc.

Siguiendo la metodología de ensayo definida en este apartado, tras la realización de cada lote de ensayo a pull-out, se ha obtenido el diámetro de barra resultante, medido en la longitud adherente de cada barra a $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ del inicio de la misma.

Capítulo 4.

Análisis de los resultados y discusión

Las barras de refuerzo de acero han sido un material eficiente y rentable de refuerzo para el hormigón hasta el día de hoy.

Sin embargo, la construcción y los requisitos ambientales cambian, por lo que los nuevos materiales FRP deben afrontarlos positivamente.

Los materiales compuestos bien aplicados en el campo de las obras civiles ofrecen unos beneficios significativos si se relaciona el coste y la durabilidad.

Otras ventajas que presentan estos novedosos materiales son la alta resistencia a tracción y rigidez en relación al peso, su capacidad de resistir la corrosión y el ataque químico, una expansión térmica controlable y unas condiciones de amortiguación y neutralidad electromagnética mayores a la de otros materiales.

Estas características pueden aportar una mayor seguridad y ciclo de vida, así como proporcionar un ahorro en los costes de fabricación y mantenimiento de las mismas.

5 En cuanto a propiedades

Una vez recogidos todos los datos, características y propiedades de cada uno de los materiales, entramos al detalle para el análisis de los

resultados, y es donde obtenemos la respuesta al porque el basalto destaca sobre el acero.

Y es por su ahorro de peso dentro de la estructura; así como los gastos de envío hasta el destino donde se va a utilizar dicho material.

El basalto tiene un peso mucho más ligero que el acero, por ejemplo con una barra corrugada de $\varnothing 9$, el peso según material sería el siguiente:

Acero : 0,52 kg/m

Basalto: 0,25 kg/m

Por tanto, es capaz de ser transportado sin la necesidad de equipos de trabajo pesados y caros, es decir, se produce un gran ahorro económico en cuanto a la maquinaria para su puesta en obra .

Tiene a su tiempo una alta resistencia al cociente de peso, ya que proporciona casi el doble de la resistencia a la tracción del acero de $1/4$ º el peso.

Esto permite una mayor flexibilidad de diseño y una menor utilización de hormigón para llevar a cabo la misma tarea, como bien hemos comentado anteriormente.

En cuanto a propiedades mecánicas, hay que decir que el basalto en comparación con el acero, este es mucho más estable térmicamente y hay una ganancia de fuerza bastante importante.

<u>Material</u>	<u>Diameter</u>	<u>Fiber Volume</u>	<u>Tensile Strength</u>	<u>Elastic Modulus</u>	<u>Elongation</u>	<u>CTE</u> 10 ⁻⁶ /°C
Steel	11.3-mm	n/a	400 MPa	200 GPa	>10%	11.7
E-Glass-TG Epoxy	9.5-mm	54%	785 MPa	43 GPa	3.7%	9.9
Carbon-Epoxy	9.5-mm	62%	1,431 MPa	120 GPa	1.4%	0
Basalt-TG Epoxy	9.5-mm	68%	1,235 MPa	95 GPa	3.1%	8.9

Tabla 22: Características mecánicas de los diferentes tipos de FRP

Y por último la principal característica, por la cual redacto este estudio, y es que el basalto tiene una mayor y mucho más elevada resistencia a la corrosión que el acero, ya que este es resistente a la acción de los álcalis y no se corroe cuando se expone a una variedad de elementos corrosivos.

El comportamiento global a tracción de las barras de BFRP es menos rígido respecto a las barras de acero.

A continuación la empresa Thermalguard Technology C-Bar™ me ha facilitado las siguientes tablas donde podemos observar claramente los resultados obtenidos después de sus respectivos ensayos entre acero y BFRP.

Typical Steel Rebar		
Steel Weight (lb/ft)	Steel Weight (kg/m)	Available Tensile Strength (ksi)
0.376	0.520	40, 60 and 75
0.668	0.994	40, 60 and 75
1.043	1.550	40, 60 and 75
1.502	2.240	40, 60 and 75
2.044	3.041	40, 60 and 75
2.670	3.970	40, 60 and 75
3.400	5.060	40, 60 and 75
4.303	6.400	40, 60 and 75
5.313	7.900	40, 60 and 75
7.650	11.400	40, 60 and 75
13.600	20.200	40, 60 and 75

Tabla 23: Características mecánicas del acero proporcionada por Thermalguard Technology C-Bar™

Typical Composite Rebar Values											
Rebar Size	Diameter (mm)	Diameter (inch)	Diameter (mm)	Tensile Strength (MPa)	Tensile Strength (ksi)	Tensile Modulus of Elasticity (GPa)	Flexural Modulus (GPa)	Glass content (% weight)	Glass content (% volume)	Weight (lb/ft)	Weight (kg/m)
#2	6	0.250	6.35	877	127	46.1	52.9	77	59	0.0575	0.09
#3	9	0.375	9.50	852	123	46.2	49.5	77	59	0.171	0.25
#4	13	0.500	12.70	791	115	46.4	44.5	77	60	0.229	0.34
#5	15	0.625	15.90	761	99	48.2	41.9	77	60	0.307	0.46
#6	19	0.750	19.00	730	95	47.6	47.3	78	60	0.448	0.67
#7	22	0.875	22.20	695	91	46.4	47.1	78	60	0.532	0.79
#8	25	1.000	25.40	681	89	51.0	46.7	78	60	0.7285	1.08
#9	29	1.128	28.70								
#10	32	1.270	32.30	550	80	42.0	45.0	78	60	0.8565	1.27
#11	35	1.410	35.80								
#14	43	1.693	43.00								
#18	57	2.257	57.30								

Tabla 24: Características del Basalto, empresa Thermalguard Technology C-Bar™

6 Propuesta para la comparativa entre barras corrugas de acero y barras de fibras de basalto.

Como ejemplo de aplicación para realizar una correcta comparativa entre diferentes barras, por una parte barras de acero y por otra parte barras de basalto, he realizado un análisis de un elemento estructural.

En este caso, es una viga plana de dimensiones 70 x 30 cm, con un recubrimiento de hormigón hasta armadura de 5 cm.

Esta viga se encuentra en cada extremo con dos pilares de 50 x 30, dando lugar a un pórtico con sus respectivos encuentros estructurales.

La carga que se aplica en el centro Q_1 de la viga, es aquella formada por la suma del peso propio de la viga, mas cargas adicionales de tabiquería y por último la carga de uso, con sus respectivos coeficientes de seguridad.

En los extremos se producirán sus respectivos momentos, los cuales voy a calcular mas adelante con el resto de cálculos.

La luz de la viga, de eje a eje de pilar es de 5 m.

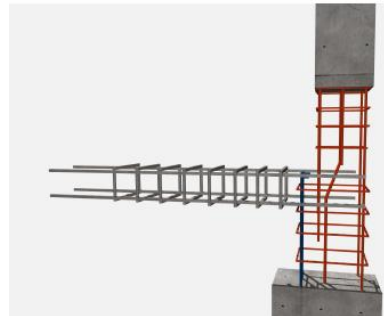
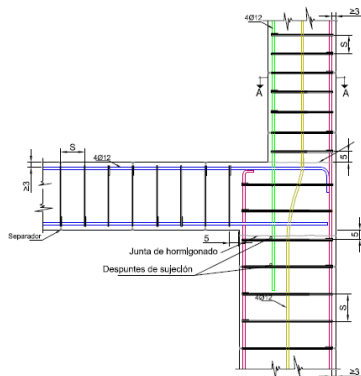
El hormigón que se va a utilizar es HA-30 realizado en central, el acero es B500 SD y el basalto que vamos a utilizar es BRB seguido por el diámetro que se vaya a utilizar.

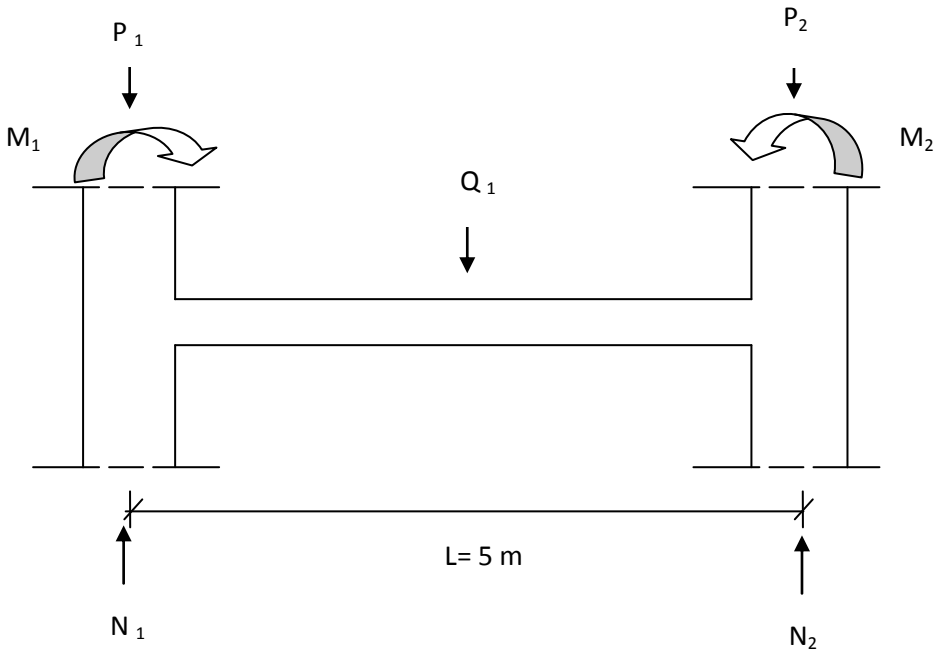
Por ultimo aplicaremos en cada uno de los caso donde sea necesario, los coeficientes de seguridad necesarios.

7 En cuanto a precios

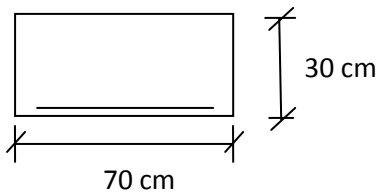
Para el análisis comparativo del precio que costaría la realización, por una parte, de un metro cúbico de hormigón armado con barras corrugadas de acero y por otra parte, el mismo tipo de hormigón pero armado con barras de basalto, se analizará un elemento estructural básico en construcción, en el cual, se realizará su respectivo cálculo estructural para la determinación del diámetro y número de barras según el tipo de material.

Por tanto sabiendo el numero de barras y el diámetro, junto con el precio proporcionado por el IVE o empresa, calcularemos el precio que cuesta el acero o el basalto en dicho elemento constructivo.





Vamos en primer lugar a realizar el cálculo con el acero, teniendo en cuenta que la viga que vamos a analizar es una viga plana con las siguientes dimensiones:



Hormigón : HA-30, con

5 cm de recubrimiento

Acero : B500 SD

Dimensión de la viga = $5 \cdot 0,7 = 3,5 \text{ m}^2$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Peso propio: }^{59} 225 \\ \text{Peso tabiquería: } 100 \text{ Kg/m}^2 \end{array} \right\} \cdot \text{coef. }^{60} 1,35 = 438,75 \text{ Kg/ m}^2$$

$$\text{Sobrecarga de uso: } 200 \text{ Kg/ m}^2 \longrightarrow \cdot \text{coef. } 1,5 = 300 \text{ Kg/ m}^2$$

$$\text{Peso total (P}_T\text{): } 738,75 \text{ Kg/ m}^2$$

$$Q_1 = P_T \cdot \text{Dimensión viga} = 2585,63 \text{ Kg} \longrightarrow 25,36 \text{ KN}^{61}$$

$$\Sigma M = Q_1 \cdot L^2 / 8 = 8080,09 \text{ Kg} \longrightarrow 79,24 \text{ KN}$$

1º Característica de los materiales

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,5^{62}} = 20 \text{ N/mm}^2 = 2 \text{ N/cm}^2$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15^{63}} = 434,78 \text{ N/mm}^2 = 43,48 \text{ N/cm}^2$$

⁵⁹ Normativa NBE-AE-88, pág. 9, tabla 2.5, pág..11 tabla 3.1

(<http://www.miliarium.com/Normativa/NBE/NBE-AE-88.pdf>)

⁶⁰ Normativa CTE, coeficientes de seguridad, "Resistencia y estabilidad/ Aptitud al servicio" pág. 4, tab.4.1

(<http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/dbse/se1/040.html>)

⁶¹ Página online para convertir unidades "convertworld.com" visitado el 25/08/14 (<http://www.convertworld.com/es/masa/Kilonewton.html>)

⁶² Es el coeficiente de minoración de resistencia del hormigón marcado por normativa.

⁶³ Es el coeficiente de minoración de resistencia del acero marcado por normativa.

$$\epsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E} = \frac{434,78}{200\,000} = 2,17\%$$

2º Calculamos el M_{lim} para ver si M_d es mayor o menor.

$$X_{lim} = 0,617 \cdot d = 0,617 \cdot 25 = 15,43 \text{ cm}$$

$$Y_{lim} = 0,8 \cdot X_{lim} = 0,8 \cdot 15,43 = 12,34 \text{ cm}$$

$$N_{c,lim} = f_{cd} \cdot A_c = 2 \cdot 12,34 \cdot 70 = 1727,6 \text{ KN}$$

$$M_{lim} = N_{c,lim} \cdot Z_{lim} = 1727,6 \cdot \left(0,25 - \frac{0,1234}{2}\right) = 325,31 \text{ KN}\cdot\text{m}$$

Zona de momento negativo

CASO 1

$M_d < M_{lim}$ $79,24 < 325,31$

$$x < X_{lim} \left\{ \begin{array}{l} A_{s2} = 0 \\ \text{Dominio 2 o 3} \\ \epsilon_{s1} > \epsilon_{yd} \longrightarrow \rho_{s1} > f_{yd} \end{array} \right.$$

Ecuaciones de equilibrio

$$\left. \begin{array}{l} 0 = N_c - A_{s1} \cdot f_{yd} \\ M_d = N_c \cdot Z \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{1º de esta despejaremos} \\ \text{la "y"} \end{array}$$

$$M_d = f_{cd} \cdot A_c \cdot Z = 2 \cdot 70 \cdot y (d - 0,5 y)$$

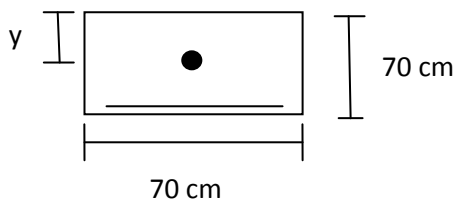
$$79,24 \cdot 10^2 = 2 \cdot 70 \cdot y (25 - 0,5y)$$

$$7924 = 3500 y - 70 y^2$$

$$70 y_2 - 3500y + 7924 = 0$$

$$y = \frac{3500 \pm \sqrt{3500^2 - 4 \cdot 70 \cdot 7924}}{2 \cdot 70} = \frac{3500 \pm 3167,22}{140} = \begin{cases} 47,62 \text{ cm} \\ 2,38 \text{ cm} \end{cases}$$

Cogemos **2,38 cm** ya que el otro dato (47,62 cm) se sale de la sección.



Ahora sustituimos en la 1ª ecuación el valor de "y" obtenido:

$$0 = N_c - A_{s1} \cdot f_{yd}$$

$$A_{s1} = \frac{N_c}{f_{yd}} = \frac{2 \cdot 70 \cdot 2,38}{43,48} = 7,66 \text{ cm}^2 \text{ para armadura de tracción}$$

Miramos en la tabla que tenemos a continuación:

Diámetro Ø (mm)	Peso g (kg/m)	NUMERO DE BARRAS								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
5	0,15	0,19	0,39	0,59	0,78	0,98	1,18	1,38	1,57	1,77
6	0,22	0,28	0,56	0,85	1,13	1,41	1,70	1,98	2,26	2,54
8	0,40	0,50	1,00	1,51	2,01	2,51	3,01	3,52	4,02	4,52
10	0,62	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07
12	0,89	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,91	9,05	10,18
14	1,21	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,77	12,32	13,86
16	1,58	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,09
20	2,47	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,84	21,99	25,14	28,28
25	3,85	4,91	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,18
32	6,31	8,04	16,08	24,13	32,17	40,21	48,26	56,30	64,34	72,38
40	9,87	12,56	25,13	37,70	50,26	62,83	75,40	87,96	100,50	113,10

Tabla 25: Para el cálculo del número y área de armadura

Existen varias posibilidades que elejiremos en funcion de las dimensiones de la viga :

7 Ø 12 (7,91 cm²)

4 Ø 16 (8,04 cm²)

3 Ø 20 (9,42 cm²)

4 Ø 12 (4,52 cm²) + 2 Ø 16 (4,02 cm²) = 8,54 cm²

Ahora realizaremos el mismo calculo pero para las barras de basalto, para con ello poder realizar comparaciones:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Peso propio: }^{64} 225 \\ \text{Peso tabiquería: } 100 \text{ Kg/m}^2 \end{array} \right\} \cdot \text{coef. }^{65} 1,35 = 438,75 \text{ Kg/m}^2$$

$$\text{Sobrecarga de uso: } 200 \text{ Kg/m}^2 \longrightarrow \cdot \text{coef. } 1,5 = 300 \text{ Kg/m}^2$$

$$\text{Peso total (P}_T\text{): } 738,75 \text{ Kg/m}^2$$

$$Q_1 = P_T \cdot \text{Dimensión viga} = 2585,63 \text{ Kg} \longrightarrow 25,36 \text{ KN}^{66}$$

$$\Sigma M = Q_1 \cdot L^2 / 8 = 8080,09 \text{ Kg} \longrightarrow 79,24 \text{ KN}$$

1º Característica de los materiales

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,5^{67}} = 20 \text{ N/mm}^2 = 2 \text{ N/cm}^2$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{1235}{1,265}^{68} = 976,28 \text{ N/mm}^2 = 97,63 \text{ N/cm}^2$$

⁶⁴ Normativa NBE-AE-88, pág. 9, tabla 2.5, pág..11 tabla 3.1

(<http://www.miliarium.com/Normativa/NBE/NBE-AE-88.pdf>)

⁶⁵ Normativa CTE, coeficientes de seguridad, "Resistencia y estabilidad/ Aptitud al servicio" pág. 4, tab.4.1

(<http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/dbse/se1/040.html>)

⁶⁶ Página online para convertir unidades "convertworld.com" visitado el 25/08/14 (<http://www.convertworld.com/es/masa/Kilonewton.html>)

⁶⁷ Es el coeficiente de minoración de resistencia del hormigón marcado por normativa.

⁶⁸ Como hemos dicho anteriormente, el basalto no está normalizado en la bibliografía y/o normativa que he consultado, a causa de que este aun se está

$$\epsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E} = \frac{976,3}{13000} = 75,10 \text{ ‰}$$

2º Calculamos el M_{lim} para ver si M_d es mayor o menor.

$$X_{lim} = 0,617 \cdot d = 0,617 \cdot 25 = 15,43 \text{ cm}$$

$$Y_{lim} = 0,8 \cdot X_{lim} = 0,8 \cdot 15,43 = 12,34 \text{ cm}$$

$$N_{c,lim} = f_{cd} \cdot A_c = 2 \cdot 12,34 \cdot 70 = 1727,6 \text{ KN}$$

$$M_{lim} = N_{c,lim} \cdot Z_{lim} = 1727,6 \cdot \left(0,25 - \frac{0,1234}{2}\right) = 325,31 \text{ KN}\cdot\text{m}$$

Zona de momento negativo

CASO 1

$M_d < M_{lim}$ $79,24 < 325,31$

$$x < X_{lim} \left\{ \begin{array}{l} A_{s2} = 0 \\ \text{Dominio 2 o 3} \\ \epsilon_{s1} > \epsilon_{yd} \longrightarrow \rho_{s1} > \rho_{yd} \end{array} \right.$$

Ecuaciones de equilibrio

$$\left. \begin{array}{l} 0 = N_c - A_{s1} \cdot f_{yd} \\ M_d = N_c \cdot Z \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{1º de esta despejaremos} \\ \text{la "y"} \end{array}$$

$$M_d = f_{cd} \cdot A_c \cdot Z = 2 \cdot 70 \cdot y (d - 0,5 y)$$

investigando, por tanto no dispongo del coeficiente de minoración, de tal forma que aplicaremos el coeficiente del acero +10%, así que el coeficiente de minoración que utilizare será 1,265.

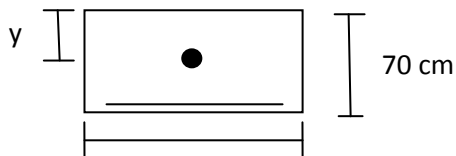
$$79,24 \cdot 10^2 = 2 \cdot 70 \cdot y (25 - 0,5 y)$$

$$7924 = 3500 y - 70 y^2$$

$$70 y^2 - 3500 y + 7924 = 0$$

$$y = \frac{3500 \pm \sqrt{3500^2 - 4 \cdot 70 \cdot 7924}}{2 \cdot 70} = \frac{3500 \pm 3167,22}{140} = \begin{cases} 47,62 \text{ cm} \\ 2,38 \text{ cm} \end{cases}$$

Cogemos **2,38 cm** ya que el otro dato (47,62 cm) se sale de la sección.



Ahora sustituyendo **70 cm** en la 1ª ecuación el valor de "y" obtenido:

$$0 = N_c - A_{s1} \cdot f_{yd}$$

$$A_{s1} = \frac{N_c}{f_{yd}} = \frac{2 \cdot 70 \cdot 2,38}{97,63} = 3,41 \text{ cm}^2 \text{ para armadura de tracción}$$

Miramos en la tabla que tenemos a continuación:

Rebar Size	(mm)	Diameter (inch)	Diameter (mm)
#2	6	0.250	6.35
#3	9	0.375	9.50
#4	13	0.500	12.70
#5	15	0.625	15.90
#6	19	0.750	19.00
#7	22	0.875	22.20
#8	25	1.000	25.40
#9	29	1.128	28.70
#10	32	1.270	32.30
#11	35	1.410	35.80
#14	43	1.693	43.00
#18	57	2.257	57.30

Tabla 26: Para el cálculo del número y área de armadura

Existen varias posibilidades que elegiremos en función de las dimensiones de la viga :

$$6 \text{ } \emptyset \text{ 6 (3,81 cm}^2\text{)}$$

$$4 \text{ } \emptyset \text{ 9 (3,80 cm}^2\text{)}$$

$$4 \text{ } \emptyset \text{ 13 (5,08 cm}^2\text{)}$$

$$4 \text{ } \emptyset \text{ 6 (2,54 cm}^2\text{)} + 2 \text{ } \emptyset \text{ 9 (1,90 cm}^2\text{)} = 4,44 \text{ cm}^2$$

PRESUPUESTO

La cantidad de metros de barra que nos hará falta será:

Metros de acero = metros de luz + longitud de anclaje + doblado + patilla

Metros de acero= $5 \text{ m} + (2 \cdot 0,04) + (2 \cdot 0,15) = 5,63 \text{ m}$ de viga

Kg. de barras de acero B500SD de $\varnothing 12$ y $\varnothing 16$, corrugado para armadura principal, incluido doblado y atado de armadura.

Material	Nº de barras	Diámetro (\varnothing)	Longitud (m)	Kg/m	Kg totales	€/kg	Importe
Armado viga	4	12	5,63	0,888	20,00	1,10	22
Armado viga	2	16	5,63	1,58	17,79	1,10	19,60
						Total	41.60 €

Kg. de barras de basalto BRB-6 y BRB-9, para armadura principal, incluido doblado y atado de armadura.

Material	Nº de barras	Diámetro (\varnothing)	Longitud (m)	Kg/m	Kg totales	€/kg	Importe
Armado viga	4	6	5,63	0,09	2,03	1,17	2,37
Armado viga	2	9	5,63	0,25	2,82	2,62	7,38
						Total	9.75 €

Capítulo 5.

Conclusiones y futuras líneas de investigación

En este último capítulo, se establecen las conclusiones a las que he llegado una vez realizado el análisis anteriormente detallado en este proyecto, entre ellas las conclusiones sobre el comportamiento adherente entre las barras de BFRP y el hormigón armado.

Al mismo tiempo, se definen las futuras líneas de investigación que pueden llevarse a cabo a partir de este estudio experimental.

1 Conclusiones

Se puede sacar la conclusión de que el basalto como material innovador aparte de tener unas propiedades mecánicas muy exclusivas y mejores que el acero, tiene un precio bastante asequible.

Es más barato ya que este no contiene otros aditivos, al igual que al pesar menos, no tiene la necesidad de utilizar una maquinaria pesada para poder transportar este material, ya que tienen un peso mucho más ligero que el propio acero.

Además, al utilizar diámetros más pequeños, los cuales el peso es más reducido, hace que el precio por peso sea más reducido.

También decir, que el comportamiento adherente inicial, es decir, hasta tensión adherente máxima, depende en mayor medida del tipo de tratamiento o geometría superficial de la barra de BFRP. Esta, al estar compuesta por fibras, presenta una superficie helicoidal que proporciona una adherencia algo mejorada, pero al mismo tiempo similar al acero, ya que este también presenta las corrugas que le proporcionan una buena adherencia.

El modo de rotura adherente de las barras de BFRP depende del tipo de tratamiento superficial, también. El basalto como hemos comprobado en los resultados tiene un comportamiento lineal hasta su rotura frágil y una resistencia a cortante muy baja a comparación con el acero.

En las barras de BFRP texturizadas la temperatura no produce una influencia significativa en el comportamiento adherente. Este tipo de barras soportan temperaturas bastante extremas, es decir, estas barras de BFRP tienen una amplia variedad de aplicación de temperatura, que va desde los $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ a los $650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Este al tener un módulo de elasticidad menor, con ausencia del límite elástico y plastificación, el basalto se ha comprobado que para el cálculo de armaduras necesaria en un elemento constructivo o un nudo estructural hará falta menor diámetro y menor cantidad de barras que el propio acero, por tanto mayor ahorro de material.

Por último se ha comprobado que si existe algún fallo por falta de adhesión geométrica superficial y el núcleo será a causa de la falta de anclaje y a causa de la elevada temperatura de polimerización de la resina adherente entre el tubo de acero y la barra, que puede producir

una descomposición de la matriz polimérica de la propia barra al alcanzar temperaturas superiores a su temperatura resistente (T_g) .

He sacado en conclusión que este tipo de materiales es perfecto para su utilización según el tipo de vivienda o edificio a realizar, ya que al aumentar mucho de diámetro, se aumenta mucho en precio por tanto no rentabiliza hacer una vivienda unifamiliar en basalto, ya que no está marcada dicha edificación por esfuerzos no soportables por el propio acero. Al igual que es rentable en zonas de fácil corrosión, ya que los gastos por mantenimiento y reparación de las posibles lesiones aumentaría mucho más que la realización de la estructura con basalto.

2 Futuras líneas de investigación

Tras la realización de este análisis, hemos conseguido muchos datos, resultados y conclusiones importantes en el tema principal de este proyecto, es decir, propiedades y características comparativas entre barras corrugadas de acero y barras corrugadas de basalto, pero también este tema ha dejado libre varios caminos a futuras líneas de investigación.

Se ha dejado vía libre a la investigación sobre:

- Realización de los ensayos correspondientes para la correcta comprobación de los datos recopilados y analizados en este proyecto.
- Análisis del cálculo de los coeficientes de adherencia, longitud de anclaje y tensión adherente mínima de las normativas de cálculo de estructuras de hormigón armado con BFRP.

- El cálculo del coeficiente de minoración del BFRP, ya que al no estar aun fijado en la bibliografía ni normativa en la cual he consultado, he estimado yo el del acero + 10% para realizar el cálculo.
- Análisis de la adherencia de las barras de BFRP según el contacto que tenga esta con los diferentes tipos de matriz polimérica.
- Análisis de la forma de puesta en obra de cada una de las barras, según normativas.
- Análisis y cálculo del atado y doblado de las barras BFRP.
- Análisis de la duración de las barras de basalto a largo plazo y su repercusión económica.

Capítulo 6.

Referencias Bibliográficas

--Almerich Chulia , Ana Isabel (2010) "Diseño, según estados límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP".

-Artículo sobre "los materiales en la arquitectura" en el Blog (<http://eauclmmateriales.blogspot.com.es/2012/06/2-el-basalto.html>) publicado el 4/06/12 y visitado el 09/07/14.

- Calvet Rodríguez, Víctor (Febrero 2014) "Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón" los directores: DR. Javier Benlloch Marco y DR. Manuel Valcuende Payá. Tesis Doctoral publicada en Valencia.

- Catálogo informativo de la empresa suministradora de barras de basalto " Thermalguard Technology, LLC" facilitada la información el 3/07/14.

- Diario online "Expansión20", artículo sobre el "boom" inmobiliario en España, publicado por L. Ramírez. Madrid (<http://www.expansion.com/especiales/20aniversario/20economicos/inmobiliario.htm>)

- Documento online sobre la fabricación del acero
(<https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3319/7/55868-7.pdf>) consultado el 22/06/14.

- Don R. Smith (26/04/2009) artículo de sobre "RockRebar tm". Raw Energy Materials Corp. Se puede acceder online a través del siguiente link: (http://newrebar.com/informacion_en_espa%C3%B1ol) visitado el 04/03/14.

- Fichas informativas gratuitas online del acero para hormigón con certificado aenor, de la empresa Calsider.

(<http://www.calsider.es/imagecatalogue/imageview/375/?RefererURL=/article/articleview/261/1/5/>)

- Ficha técnica de barras de basalto proporcionada por la empresa "PPC" Provence Performance Chemical
(<http://www.provenperformancechemical.com>)

- Garcés Terradillo, Pedro ; Climent Llorca, ; Miguel Ángel y Emilio Zornoza Gómez (s/f)" Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado de ECU"editorial club universitario.

- Gonzales Fernández, José Antonio y Miranda Vidales, Juana (Año 2007) "Corrosión en estructuras de hormigón armado: fundamentos, medidas, diagnosis y prevención" [web:](#)

- Presto 8.8, el IVE (base de datos)

- Libro informativo de la empresa Galvanizadora Valenciana" Galesa" y de su página web: <http://www.galesa.com/v14/>

--Norma Italiana sobre " Istruziori per la progettazione l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo armado con barre di materiale composito fibrorinforzado"

(http://www.cnr.it/documenti/norme/IstruzioniCNR_DT203_2006.pdf)

-Normas ACI:

http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_318-05_Espanhol.pdf

<http://www.radyab.co/content/media/article/13.pdf>

http://www.radyab.co/content/media/article/4403R_04_0.pdf

-Normas ASTM:

(<http://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=ACi&>)

- Normativa ACI 440.3R-04 " Guide test methods fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures "

(http://www.radyab.co/content/media/article/4403R_04_0.pdf).

-Normativa NBE-AE-88, pág. 9, tabla 2.5, pág..11 tabla 3.1

(<http://www.miliarium.com/Normativa/NBE/NBE-AE-88.pdf>).

-Normativa CTE, coeficientes de seguridad, "Resistencia y estabilidad/ Aptitud al servicio" pág. 4, tab.4.1

(<http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/dbse/se1/040.html>)

- Monzó Bello ,Pablo (s/f) Trabajo Final de Máster sobre "Determinación de la velocidad de corrosión en armaduras mediante técnicas cuantitativas de análisis electroquímico " visitada la página de Riunet el 11/06/14(<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/18242/Tesis20Pablo%20Monzonl.pdf?sequence=2>)

- Página de Ingeniería Civil y medio ambiente " Miliarium"
(http://www.miliarium.com/prontuario/tablas/normasmv/tabla_2-1.asp)
- Página web empresa "Instron", información sobre soluciones para ensayos (<http://www.instron.com.es/wa/solutions/Tensile-Strength-of-Basalt-Fiber-Reinfor.aspx>) visitada 22/06/14.
- Página online para convertir unidades "convertworld.com" visitado el 25/08/14 (<http://www.convertworld.com/es/masa/Kilonewton.html>)
- Portal online sobre arquitectura, ingeniería, decoración de interiores & hogar(<http://www.arqhys.com/construccion/acerocharacteristicas.html>) visitado el 03/08/14.
- Poveda Bernal , Jesús (2012) "Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliolefínica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte" Directores de la tesis: Dr. José M^a Pastor Barajas y Dr. Juan Carlos Merino Senovilla . Tesis Doctoral en la Universidad de Valladolid.
- Video youtube sobre el ensayo de tracción en barra de acero. El vídeo muestra la gráfica de fuerza aplicada (en kN) vs. alargamiento (en cm) a lo largo de la prueba, indicando los nombres de las fases más importantes que se atraviesan. Publicado el 20/05/2013 y visto el 03/08/14 (<https://www.youtube.com/watch?v=4p7bvJGN4Po>).
- Video youtube sobre Rebar Tensile Strength Test - www.kouryengineering.com (909) 606-6111 Yield and Ultimate Yield, Concrete Compression, Testing and Inspection Services, actualizado el 5/11/09 y visto el 11/08/14 (https://www.youtube.com/watch?v=CXdJSEb_DLc).

Capítulo 7.

Índice de Figuras

Figura 1: Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras.....	19
Figura 2: Esquema de la corrosión de las armaduras.....	22
Figura 3: Variación del contenido crítico en cloruros según la humedad ambiente.....	24
Figura 4: Coste total por corrosión en USA 1988. Fuente: artículo “Corrosion cost and preventive strategies in the United States”. Año 2002.....	36
Figura 5: Coste por sectores industriales por corrosión en USA 1988. Fuente: artículo “Corrosion cost and preventive strategies in the United States”. Año 2002.....	37
Figura 6:Corrosión en el acero.....	38
Figura 7:Fabricación del acero en horno eléctrico.....	57
Figura 8:Altura de corruga UNE-EN ISO 15630-1:2003.....	64
Figura 9:Tipos de acero corrugado.....	66
Figura 10: Diagrama tensión-deformación de cálculo para armaduras pasiva:.....	69
Figura 11;Teoría de Bowen, serie continua y discontinua.....	74
Figura 12:Resumen de la formación de rocas ígneas en función del tipo de magma.....	76
Figura 13:Composición aproximada de las principales rocas ígneas volcánicas.....	77

Figura 14:Puente totalmente armado con redondos de FRP. EUROCRETE Project.....	82
Figura 15:Muestra de obsidiana, sílex y útiles líticos prehistóricos	83
Figura 16: Barras de BFRP (imagen electrones retrodispersados): sección transversal (A), zooms consecutivos (b-d) necesarios para determinar, usando software de análisis de imagen, número medio de filamentos y el diámetro del filamento. Es posible observar que la resina moja adecuadamente las fibras creando un fuerte interfaz de fibra / matriz. Los daños producidos a la fibra también son visibles, probablemente debido a la etapa de corte para el análisis SEM.	87
Figura 17:Esquema del proceso de obtención de la fibra de basalto....	89
Figura 18: Proceso de fabricación de barras de BFRP	92
Figura 19: Proceso de Pultrusión.....	93
Figura 20:Variación de la T_g y rigidez del polímero en presencia de humedad (Gibson, 1994).	96
Figura 21:Grafica de tensión/deformación de diferentes tipos de fibras: a) Carbono (alto módulo); b) Carbono (alta resistencia); c) Aramida; d) S-glass; e) E-Glass; f) Basalto. Adaptado de FIB., 2007.....	108
Figura 22: Barra de basalto.....	114
Figura 23:Fibras de basalto en barras corrugadas.....	115
Figura 24:Barras de basalto	115
Figura 25: Barras corrugadas de acero	116
Figura 26: a) Sistema de anclaje, y b) tapas de plástico utilizado	117
Figura 27: Dimensiones y detalles del sistema de anclaje de varillas de BFRP	118
Figura 28: Longitudes de anclaje de barras FRP	120
Figura 29:Captador de deformaciones.....	122
Figura 30: Maquina de ensayo a tracción.....	122
Figura 31: Pestañas de sujeción de los extremos de la barra.....	123

Figura 32: Encofrado de madera para dar verticalidad mediante el fraguado de la resina	124
Figura 33: Las muestras después de la prueba de tracción (A) y muestra de fallo del sistema de anclaje (B).	125
Figura34: Gráfica de los resultados del ensayo a tracción	127
Figura 35:Dimensiones y características de las probetas para el ensayo de adherencia por pullout centrado. ACI.440.3R-04.....	131
Figura 36:Dimensiones y características de las probetas para el ensayo de adherencia por pull-out centrado. JSCE 1997(b).....	132
Figura 37: Dimensiones y características de las probetas para el ensayo de adherencia por pull-out centrado, con la influencia de la posición de la barra. ACI.440.3R-04.....	133
Figura 38: Metodología del ensayo de pullout.....	134
Figura 39: Dimensiones y características de las probetas para el ensayo de adherencia por pull-out con confinamiento. Tepfers et al.,1992. .	135
Figura 40:Preparación de moldes y barras para vertido de hormigón: tubos PVC y tapones.....	139
Figura 41: Preparación de las probetas de pull-out	140
Figura 42: Preparación de los anclajes de las probetas para el ensayo de pull-out	141
Figura 43: Ensayo a compresión del hormigón	142
Figura 44: Ensayo de pull-out	143

Índice de Tablas

Tabla 1: Riesgo de corrosión de la barra de refuerzo con relación a los rangos de concentraciones críticas de iones cloruros totales y solubles	25
Tabla 2: Relaciones agua/cemento y las resistencias mínimas recomendadas para las diferentes zonas de exposición	28
Tabla 3: Recubrimientos recomendados	28
Tabla 4: Valores típicos de la velocidad de corrosión de aceros estructurales en ambiente marítimo	30
Tabla 5: Costes estimados por daños de corrosión. Fuente: “Corrosión y degradación de materiales” Editorial Síntesis, capítulo I, pág. 19.	39
Tabla 6: Revestimientos mínimos de las armaduras según condiciones de exposición	42
Tabla 7: Propiedades mecánicas de la armadura pasiva	66
Tabla 8: Tabla de coeficientes de minoración de resistencias ELU	67
Tabla 9: Propiedades del acero en armadura pasiva	68
Tabla 10 : Propiedades comunes de los aceros	69
Tabla 11: Principales rocas ígneas volcánicas	72
Tabla 12: Desventajas y ventajas de las resinas termoestables y termoplásticas	95
Tabla 13: Propiedades físicas y mecánicas de las resinas comerciales ..	98
Tabla 14: Propiedades mecánicas de la fibra de basalto para el diseño de refuerzos estructurales	104
Tabla 15: Tabla comparativa de diferentes tipos de barras	104
Tabla 16: Propiedades físicas	105
Tabla 17: Propiedades químicas	106
Tabla 18: Propiedades Térmicas	106

Tabla 19:Propiedades de las fibras de refuerzo de barras de FRP. Adaptado de FIB Task Group 9.3	107
Tabla 20: Ventajas y desventajas de refuerzo de FRP	110
Tabla 21: Resultados del ensayo a tracción ⁵³	128
Tabla 22: Características mecánicas de los diferentes tipos de FRP	145
Tabla 23:Características mecánicas del acero proporcionada por Thermalguard Technology C-Bar™	146
Tabla 24: Características del Basalto, empresa Thermalguard Technology C-Bar™	147
Tabla 25: Para el cálculo del número y área de armadura	154
Tabla 26: Para el cálculo del número y área de armadura	158