

---

# *Estudio comparativo de barras corrugadas de diferentes materiales para armar hormigón*

---

Trabajo Final de estudios de Grado

Escuela Técnica Superior de Arquitectura

Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Autor: Javier Torres Vegara

Tutor: D. José M. Vercher Sanchis

Curso 2018-2019



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA



## Resumen

Con el fin de reducir el actual impacto generado de la actividad de la construcción, la arquitectura progresa hacia una práctica más comprometida con el medioambiente, trae consigo el desarrollo de nuevas técnicas, soluciones y materiales alternativos a los tradicionales. Estas variantes deben presentar no únicamente una visión más sostenible, sino que deben asegurar las mismas condiciones de seguridad, servicio y función.

Este estudio se centra en los elementos de refuerzo del hormigón, conocidas las barras corrugadas de acero como producto más utilizado en esta práctica, aparecen diferentes alternativas a ellas, como barras corrugadas de acero inoxidable o barras corrugadas de polímeros reforzados con fibras, como las de vidrio o de basalto. Presentado cada una de ellas diferentes propiedades, el objeto de este estudio recae en su comparación.

La comparación de estos cuatro tipos de barras corrugadas para armar hormigón se ha realizado atendiendo a sus comportamientos mecánicos, mediante la ejecución propia de ensayos geométricos, ponderales y a tracción. En estos ensayos se analizan las propiedades mecánicas de cuatro muestras de cada uno de los tipos de barras.

Por otro lado, con el fin de comparar su aspecto sostenible, debido a las limitaciones que imposibilitan el análisis del ciclo de vida, se lleva a cabo un análisis de la capacidad de los diferentes materiales para adaptarse a las características propias de los materiales sostenibles.

Los resultados obtenidos de ambos análisis muestran que las soluciones de barras de polímeros reforzados presentan ciertas propiedades diferentes frente a las de acero y acero inoxidable. Las barras de polímeros reforzados caracterizadas por su comportamiento elástico-lineal con ausencia de límite elástico presentan unas relaciones de peso/resistencias más pequeñas que el resto, lo que se traduce en mayor capacidad de absorber esfuerzos con pesos menores. Así mismo, desde el punto de vista sostenible, estas presentan una buena durabilidad, pero la falta de desarrollo de técnicas que permitan su reciclaje frena su progreso como alternativa real a los materiales tradicionales.

## Palabras clave

Barras corrugadas de acero; Barras corrugadas de acero inoxidable; Barras corrugadas de fibra de vidrio; Barras corrugadas de fibra de basalto; FRP; GFRP; BFRP; Resistencia a tracción; Sostenibilidad; Desarrollo sostenible.

## Resum

Amb la finalitat de reduir l'actual impacte generat de l'activitat de la construcció, l'arquitectura progressa cap a una pràctica més compromesa amb el medi ambient, porta amb si el desenvolupament de noves tècniques, solucions i materials alternatius als tradicionals. Aquestes variants han de presentar no únicament una visió més sostenible, sinó que han d'assegurar les mateixes condicions de seguretat, servei i funció.

Aquest estudi se centra en els elements de reforç del formigó, conegudes les barres corrugades d'acer com a producte més utilitzat en aquesta pràctica, apareixen diferents alternatives a elles, com a barres coorugades d'acer inoxidable o barres corrugades de polímers reforçats amb fibres, com les de vidre o de basalt. Presentat cadascuna d'elles diferents propietats, l'objecte d'aquest estudi recau en la seua comparació.

La comparació d'aquests quatre tipus de barres corrugades per a armar formigó s'ha realitzat atenent els seus comportaments mecànics, mitjançant l'execució pròpia d'assajos geomètrics, ponderals i a tracció. En aquests assajos s'analitzen les propietats mecàniques de quatre mostres de cadascun dels tipus de barres.

D'altra banda, amb la finalitat de comparar el seu aspecte sostenible, a causa de les limitacions que impossibiliten l'anàlisi del cicle de vida, es realitza una anàlisi de la capacitat dels diferents materials per a adaptar-se a les característiques pròpies dels materials sostenibles.

Els resultats obtinguts dels anàlisis mostren que les solucions de barres de polímers reforçats presenten unes propietats diferents enfront de les d'acer i acer inoxidable. Les barres de polímers reforçats caracteritzades pel seu comportament elàstic-lineal amb absència de límit elàstic presenten unes relacions de pes/resistència més baixes que la resta, la qual cosa es tradueix en major capacitat d'absorbir esforços amb pesos menors. Així mateix, des del punt de vista sostenible, aquestes presenten una bona durabilitat, però la falta de desenvolupament de tècniques que permeten el seu reciclatge frena el seu progrés com a alternativa real als materials tradicionals.

## Paraules clau

Barres corrugades d'acer; Barres corrugades d'acer inoxidable; Barres corrugades de fibra de vidre; Barras corrugades de fibra de basalt; FRP; GFRP; BFRP; Resistència a tracció; Sostenibilitat; Desenvolupament sostenible.

## **Abstract**

With the aim of reducing the current impact caused by the construction activity, the architecture is moving towards to a better practice more committed to the environment. This results in new techniques, solutions and alternative materials that replace the traditional ones. All of these variant must present not only a sustainable vision, but a same result in terms of security, service and usage.

This study is mainly based on the strengthening elements of the concrete dam, known as steel rebars. Although these rebars are the most widely used material on these practices, these are not the only ones, stainless steel, fiber reinforced polymers, basalt or the glass ones are different alternatives of rebars usage. When all of these properties are investigated, the reason for the study is to compare them.

All of the comparison, among the four types of rebars has been developed attending to the mechanical behaviour through the geometric, adjusted and tensile strength tests.

Furthermore, for the purpose of comparing the environmental aspect due to the limitations that make the analysis of the life cycle a more complex one, an adaption test in order to know the capacity of the eco-friendly materials is practised.

The obtained results in both análisis show that the fiber reinforced polymers rebars present different properties in comparison with the steel or the stainless steel ones. Due to the elastic and lineal behaviour of the FRP rebars with their respective absence of yield point present more reduced weight and resistance than the other alternatives. In the other words, a greater ability to absorb efforts with lower weight. Similarly, within a sustainable perspective, the FRP rebars display good durability, but the lack of developing techniques that allow its reuse slow down its progress as a real solution to the traditional materials.

## **Key words**

Steel corrugated bars; stainless steel corrugated bars; Fiberglass corrugated bars; Basalt fiber corrugated bars; FRP; GFRP; BFRP; Tensile strength; Sustainability; Sustainable development.

## Índice

Resumen .....	1
Resum .....	2
Abstract.....	3
Índice .....	4
Índice de tablas .....	6
Índice de figuras.....	7
Abreviaturas.....	8
<b>1. Introducción.....</b>	<b>11</b>
1.1 Motivación .....	11
1.2 Objetivos.....	12
<b>2. Estado del arte .....</b>	<b>15</b>
2.1 Acero .....	15
2.1.1 Composición .....	16
2.1.2 Proceso de fabricación.....	17
2.2 Acero Inoxidable .....	20
2.2.1 Composición .....	21
2.2.2 Proceso de fabricación.....	22
2.3 Polímeros reforzados con fibras (FRP) .....	23
2.3.1 Composición .....	24
2.3.1.1 Fibra de vidrio (GFRP) .....	25
2.3.1.2 Fibra de Basalto .....	25
2.3.2 Proceso de fabricación.....	26
<b>3. Estudio del comportamiento mecánico .....</b>	<b>31</b>
3.1 Material y métodos .....	31
3.1.1 Muestras.....	31
3.1.2 Métodos experimentales .....	34
3.1.2.1 Estudio geométrico y ponderal .....	34
3.1.2.2 Ensayo a tracción .....	36
3.2. Desarrollo experimental y resultados .....	41
3.2.1 Estudio geométrico y ponderal.....	41
3.2.2 Ensayo a tracción .....	44
3.2.2.1 Barras corrugadas de acero .....	44
3.2.2.2 Barras corrugadas de acero inoxidable.....	46

3.2.2.3 Barras GFRP .....	48
3.2.2.4 Barras BFRP .....	51
<b>4. Estudio cualitativo de la sostenibilidad .....</b>	<b>57</b>
4.1 Análisis del ciclo de vida .....	57
4.2 Estudio de las características sostenibles .....	59
4.2.1 Acero .....	59
4.2.2 Acero inoxidable .....	61
4.2.3 FRP .....	62
<b>5. Discusión de resultados .....</b>	<b>67</b>
5.1 Estudio del comportamiento mecánico .....	67
5.2 Estudio cualitativo de la sostenibilidad .....	69
<b>6. Conclusiones y futuras líneas de investigación. ....</b>	<b>75</b>
6.1. Conclusiones .....	75
6.2. Futuras líneas de investigación .....	76
<b>7. Bibliografía .....</b>	<b>79</b>
7.1 Referencias de figuras .....	82
7.2 Referencias de tablas .....	83

## Índice de tablas

Tabla 2.1. Resumen del crecimiento medio anual de 1980 a 2017. ....	21
Tabla 2.2. Composición (% en peso) de los diferentes tipos de fibras de vidrio. ....	25
Tabla 2.3. Composición (% en peso) de las fibras de basalto.....	26
Tabla 3.1. Características de las barras corrugadas de acero definidas por el fabricante. ....	32
Tabla 3.2. Características de las barras corrugadas de acero inoxidable definidas por el fabricante. ....	32
Tabla 3.3. Composición química de las barras corrugadas de acero inoxidable definidas por el fabricante. ....	33
Tabla 3.4. Características de las barras corrugadas de fibra de vidrio definidas por el fabricante .....	33
Tabla 3.5. Características de las barras corrugadas de fibra de basalto definidas por el fabricante .....	33
Tabla 3.6. Resultados del ensayo geométrico y ponderal a barras corrugadas de acero .....	41
Tabla 3.7. Resultados del ensayo geométrico y ponderal a barras corrugadas de acero inoxidable. ....	42
Tabla 3.8. Resultados del ensayo geométrico y ponderal a barras corrugadas de fibra de vidrio. ....	42
Tabla 3.9. Resultados del ensayo geométrico y ponderal a barras corrugadas de fibra de basalto. ....	43
Tabla 3.10. Resultados del ensayo a tracción a barras corrugadas de acero.....	45
Tabla 3.11. Resultados medios y característicos del ensayo a tracción de barras corrugadas de acero.....	45
Tabla 3.12. Resultados del ensayo a tracción a barras corrugadas de acero inoxidable.....	47
Tabla 3.13. Resultados medios y característicos del ensayo a tracción de barras corrugadas de acero inoxidable. ....	47
Tabla 3.14. Resultados del ensayo a tracción a barras corrugadas GFRP. ....	50
Tabla 3.15. Resultados medios y característicos del ensayo a tracción de barras GFRP.....	50
Tabla 3.16. Resultados del ensayo a tracción a barras corrugadas BFRP.....	53
Tabla 3.17. Resultados medios y característicos del ensayo a tracción de barras BFRP. ....	53
Tabla 4.1. Cuadro de las características sostenibles del acero. ....	59
Tabla 4.2. Cuadro de las características sostenibles del acero inoxidable. ....	61
Tabla 4.3. Cuadro de las características sostenibles de los FRP.....	62
Tabla 5.1. Cuadro resumen ensayo geométrico y ponderal. ....	67
Tabla 5.2. Relación peso/resistencia de las barras corrugadas.....	70
Tabla 5.3. Precios de venta de barras corrugadas (€/m) .....	70

## Índice de figuras

Figura 1.1 Las tres dimensiones del desarrollo sostenible.....	11
Figura 2.1. Diagrama hierro-carbono.....	16
Figura 2.2. Esquema del proceso de acería. ....	19
Figura 2.3. Esquema del proceso de laminación en caliente. ....	20
Figura 2.4. Esquema de la clasificación de los aceros inoxidable.....	22
Figura 2.5. Esquema del proceso de pultrusión.....	27
Figura 3.1. Muestras de estudio .....	31
Figura 3.2. Barra FRP dispuesta con los anclajes de sujeción. ....	36
Figura 3.3. Máquina electromecánica universal IBEREST modelo STIB – 200/W.....	37
Figura 3.4. Diagrama límite elástico convencional.....	39
Figura 3.5. Diagrama alargamientos y resistencia a tracción.....	40
Figura 3.6. Barra corrugada de acero. ....	41
Figura 3.7. Barra corrugada de acero inoxidable.....	42
Figura 3.8. Barra corrugada GFRP.....	42
Figura 3.9. Barra corrugada BFRP. ....	43
Figura 3.10. Ensayo a tracción barra corrugada de acero.....	44
Figura 3.11. Diagrama Fuerza-extensión del ensayo a tracción de las barras corrugadas de acero. .....	45
Figura 3.12. Ensayo a tracción barra corrugada de acero inoxidable. ....	46
Figura 3.13. Diagrama Fuerza-extensión del ensayo a tracción de las barras corrugadas de acero inoxidable. ....	47
Figura 3.14. Extremo trabajado de una barra GFRP.....	48
Figura 3.15. Ensayo a tracción barra corrugada GFRP. ....	49
Figura 3.16. Rotura inferior de una barra GFRP.....	49
Figura 3.17. Rotura superior de una barra GFRP. ....	49
Figura 3.18. Diagrama Fuerza-extensión del ensayo a tracción de las barras corrugadas GFRP. ....	50
Figura 3.19. Extremo trabajado de una barra BFRP.....	51
Figura 3.20. Barra BFRP siendo trabajada mediante aprieto .....	51
Figura 3.21. Ensayo a tracción barra corrugada BFRP .....	52
Figura 3.22. Rotura del extremo de una barra BFRP.....	52
Figura 3.23. Rotura con pérdida de sección de una barra BFRP .....	52
Figura 3.24. Diagrama Fuerza-extensión del ensayo a tracción de las barras corrugadas BFRP ..	53
Figura 4.1. Esquema de las etapas del ciclo de vida. ....	58

## Abreviaturas

A	Alargamiento total porcentual de rotura. %.
ACI	"American Concrete Institute" Instituto Americano de Hormigón.
ACV	Análisis del ciclo de vida.
Ag	Alargamiento plástico porcentual bajo carga máxima. %.
Agt	Alargamiento total porcentual bajo carga máxima. %.
BFRP	"Basalt Fiber Reinforced Polymer" Polímeros Reforzados de Fibra de Basalto.
CFRP	"Carbon Fiber Reinforced Polymer" Polímeros Reforzados de Fibra de Carbono.
E	Módulo de Elasticidad. MPa.
Fe	Carga correspondiente al límite elástico. Kn.
Fm	Carga máxima a tracción. Kn.
Fr	Carga de rotura a tracción. Kn.
FRP	"Fiber Reinforced Polymer" Polímeros Reforzados de Fibra.
GFRP	"Glass Fiber Reinforced Polymer" Polímeros Reforzados de Fibra de Vidrio.
L	Longitud inicial de una sección de la barra medida a 5 veces el diametro. mm.
L <sub>0</sub>	Longitud final en una sección de la barra. mm.
L <sub>1</sub>	Longitud final en la sección de rotura de la barra. mm.
m	Masa real de las barras. Kg/m.
P	Peso de las barras. Kg.
Rm	Resistencia máxima a tracción de las barras. MPa.
<b>Rm<sub>ck</sub></b>	Resistencia máxima característica a tracción de las barras. MPa.
Rp <sub>0,2%</sub>	Límite elástico convencional al 0,2%. MPa.
S	Área de sección transversal equivalente de las barras. mm <sup>2</sup> .
δ	Desviación típica.

## 1. INTRODUCCIÓN

---



## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

En la actualidad, uno de los principales problemas sociales a escala global se fundamenta en el elevado ritmo de consumo de recursos naturales, pronunciado por la incapacidad del planeta de mantenerlo. Gran parte de culpa la tienen las actividades derivadas de la industria de la construcción, el sector de la vivienda absorbe un 41 % de energía total consumida en la Unión Europea, superando el consumo derivado de la agricultura y el transporte (Vercher Sanchis, J. M. 2017).

Este hecho hace inevitable la aparición de una arquitectura comprometida con el medio ambiente, que tiene como fin reducir los impactos ambientales provocados por dicha actividad, basándose en unos principios que tengan como base una construcción ecológica y sostenible. Esta arquitectura se basa en el concepto de sostenibilidad, el cual se entiende como un proceso cuyo objetivo final sea un desarrollo sostenible, es decir, tal y como se definió en el informe Brundtland, aquel que satisface las necesidades de la actual generación sin comprometer la capacidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades.

En este desarrollo sostenible se conciben tres dimensiones, que deberán integrarse para obtener el objetivo de la sostenibilidad, estas son las dimensiones socioculturales, económica y ecológica.



Figura 1.1 Las tres dimensiones del desarrollo sostenible.

Fruto del desarrollo de esta arquitectura más comprometida con el medio ambiente, la elección del arquitecto tiende cada vez más a soluciones y materiales que aseguren el objetivo de dotar a la construcción de un nuevo aspecto más responsable con el medio ambiente.

Ahora bien, en este punto es donde se puede generar conflicto, pues será fundamental que estos materiales garanticen unas prestaciones mecánicas óptimas para su uso, pudiendo competir con materiales a priori menos sostenibles. Puesto que el déficit de capacidades mecánicas de materiales sostenibles en relación con materiales con mayor impacto, a largo tiempo puede suponer consecuencias opuestas a las esperadas.

Además, se debe tener en cuenta que la aplicación de este tipo de arquitectura en el mercado de la construcción actual será difícil, puesto que romper con hábitos establecidos, necesita de algo más que unas mejores aptitudes sostenibles, siendo primordial la necesidad de demostrar sus facultades para mantener las mismas prestaciones de uso, funcionalidad y seguridad.

Dentro de la práctica constructiva, atendiendo a los diferentes tipos de estructuras que se contemplan, los sistemas de hormigón armado son los más habituales, por las ventajas que aporta el hecho de que sea un sistema moldeable gracias a las propiedades tanto del hormigón como del acero, siendo este el material más utilizado tradicionalmente como refuerzo.

Actualmente y como fruto del progreso de la arquitectura en este ámbito estructural, surgen nuevas alternativas a las barras corrugadas de acero como refuerzo del hormigón. El uso de estas variantes al acero como refuerzo, pasa en un primer momento por garantizar las capacidades mecánicas de estas, y posteriormente se atenderá a sus aptitudes sostenibles, ya que será primordial garantizar las prestaciones requeridas como elemento estructural.

Por tanto, la necesidad latente de desarrollar una arquitectura más eficiente tanto desde el punto de vista sostenible como desde el punto de vista mecánico justifica la intención de estudiar y comparar diferentes tipos de barras corrugadas para armar hormigón.

## 1.2 Objetivos

El objetivo general del presente Trabajo Final de Estudios de Grado es estudiar y comparar el comportamiento de barras corrugadas de diferentes materiales para servir de refuerzo del hormigón.

Los objetivos específicos son:

1. Desarrollar ensayos experimentales geométricos, ponderales y de tracción, a barras corrugadas de acero, de acero inoxidable, de fibra de basalto y de fibra de vidrio.
2. Analizar y comparar los resultados obtenidos acerca de las propiedades geométricas, ponderales y mecánicas de las barras corrugadas de acero, de acero inoxidable, de fibra de basalto y de fibra de vidrio.
3. Desarrollar un estudio cualitativo de la sostenibilidad de los diferentes materiales mediante el análisis de sus capacidades para adecuarse a una Arquitectura Sostenible.
4. Indagar sobre el comportamiento mecánico y sostenible de los materiales FRP.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---



## 2. Estado del arte

El trabajo tiene como objetos de estudio y comparación cuatro tipos de barras corrugadas de materiales diferentes para armar hormigón, y son los siguientes:

- Acero, por ser el material más utilizado en la actualidad como refuerzo de estructuras de hormigón.
- Acero inoxidable, como alternativa directa al acero en ambientes muy corrosivos.
- Polímeros reforzados con fibra (FRP), que poseen una composición totalmente diferente. En concreto se estudiarán los reforzados por fibra de vidrio (GFRP) y fibra de basalto (BFRP).

En un paso previo a la ejecución de los diferentes estudios a los que serán sometidas las barras, se desarrolla una breve explicación de cada uno de los materiales sirviendo esta, de antecedente.

### 2.1 Acero

Dentro del sector de la edificación es uno de los materiales más utilizados en todo proceso constructivo, gracias a la versatilidad que presenta, tanto en sus formatos como en su composición. Sus propiedades en general abarcan un intervalo muy amplio, desde resistencias moderadas y ductilidades altas hasta productos con resistencias muy elevadas (Belzunce, F.J. 2001).

Su uso data del siglo XVIII, cuando Benjamin Huntsman, descubrió por casualidad el acero al mezclar carbón vegetal con hierro en un crisol. En 1856, se crea el convertidor Bessemer, patentado por Henry Bessemer, patentando un método para fabricar acero a gran escala de forma más económica. Ese mismo año, los hermanos Siemens patentan un horno de solera que incorporaba precalentadores, pero sin existir hasta que, en 1864, los hermanos Martín lo desarrollaran y lo mejoraran. En 1902 se desarrolla el proceso de fundición de chatarra en el horno mediante un arco eléctrico que producía un acero más puro, y finalmente se llega en 1950 a la fundición continua (Revista ARQHYS,2012(22)).

Sin embargo, en 1889 con la exposición Universal de París, se muestra al mundo las prestaciones que ofrece este material para construir estructuras metálicas. La construcción de la Torre Eiffel marca un antes y un después en el uso del acero en la construcción, muchos fueron los edificios con estructura metálica los construidos posterior a esta (Revista ARQHYS,2012(24)). Años posteriores, comenzó a difundirse el sistema Hennebique, creando un sistema de forjados tubulares de hormigón reforzados con hierro.

Así mismo, con el paso del tiempo se ha observado que el acero presenta dos grandes desventajas, por un lado, se trata de un material transmisor de corriente eléctrica, y por otro la oxidación, aspecto que más problemática genera el uso de este (Revista ARQHYS,2017). Aun así, estos dos grandes aspectos negativos, se pueden resolver con la aleación adecuada. Un acero al níquel o al aluminio permite que tanto la transmisión del calor como de la corriente se reduzca, o en el caso de la oxidación el producto más usado para combatirla es el acero inoxidable, basado en una aleación con cromo que aporta las condiciones necesarias para evitarla, además se pueden encontrar aceros microaleados, que presentan diferentes mejoras frente al acero al carbono tradicional.

Entre sus diferentes aplicaciones se encuentra su uso como elemento estructural, su eficacia como tal se debe a que se puede fabricar con la forma más adecuada para absorber cualquier tipo de esfuerzo, ya sea en forma de perfil o de barra de refuerzo en las estructuras de hormigón, entre otros. Su elevado uso además es causa de las óptimas propiedades que presenta el material como resistencia a tracción, ductilidad y soldabilidad (Revista ARQHYS,2017).

### 2.1.1 Composición

El acero tradicional y más abundante es el acero al carbono cuya estructura generalmente se basa en una aleación en caliente de carbono con hierro y en ocasiones estos contienen, además, manganeso, silicio, cobre, etc...

El elemento mayoritario en la composición del acero es el hierro, la gran cantidad que se puede obtener de la corteza terrestre permite al acero ser tan utilizado, a su vez le aporta sus características metálicas. Este es un mineral tenaz, con diámetro atómico  $d_A = 24,8$  nm, con una temperatura de fusión de  $1535$  °C, generándose por tanto un gran consumo energético durante el proceso de fabricación del acero (Revista Textos Científicos, 2013).

El carbono por su parte es blando y frágil, con un diámetro atómico más pequeño que el hierro  $d_A = 15,4$  nm. Cuando se produce la aleación, este transfiere propiedades tales como elasticidad y dureza, entre otras. El acero al carbono utilizado con funciones estructurales también se conoce como acero estructural, y posee un contenido de carbono del 0,24%, siendo demasiado dúctil en contenidos superiores y rígido en porcentajes menores (Revista Textos Científicos, 2013).

La estructura se basa en la inserción del carbono en los huecos de las diferentes estructuras de hierro. En cuanto a la microestructura del acero, se puede observar que los granos pueden estar constituido por fases, como: austenita, ferrita, perlita y cementita. Cada una de ellas contiene propiedades diferentes, lo que determina las propiedades finales del acero. Además, durante el proceso de fabricación y manufactura pueden aparecer otras fases que pueden contaminar el acero y que se deben evitar.

Mediante el diagrama de hierro-carbono (*Figura 2.1*) se pueden apreciar el conjunto de fases.

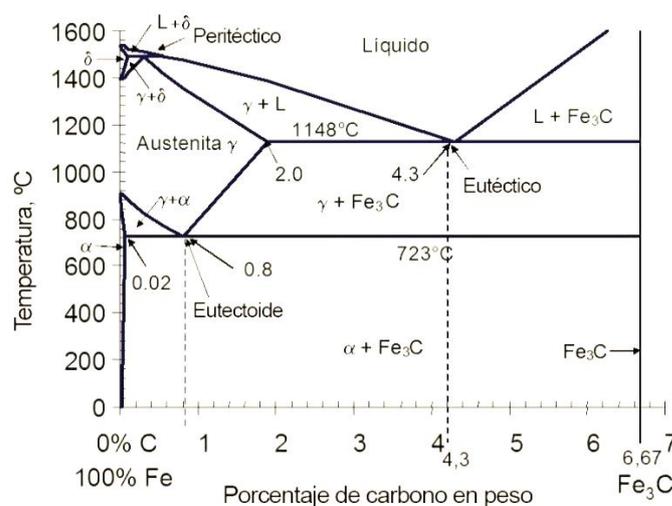


Figura 2.1. Diagrama hierro-carbono.

Dentro de todas las fases existen tres puntos característicos, en los que se producen cambios de estructura (Belzunce, F.J. 2001).

- Punto peritéctico: a una temperatura de 1495 °C, obteniéndose hierro y (0,17% de carbono) a partir de una fase líquida (0,53% de carbono)
- Punto eutéctico: a una temperatura de 1148 °C, se obtiene a partir de una fase líquida (4.3 % de carbono), granos de austenita y cementita.
- Punto eutectoide: a una temperatura de 727 °C, se convierten los granos austeníticos en granos de ferrita y cementita

El control de estas temperaturas es muy importante a la hora de la determinación de las propiedades mecánicas del acero, teniendo a su vez mucha importancia la velocidad de enfriamiento, que determinará su microestructura final.

La gama de tipos de acero que se pueden encontrar es muy amplia debido a las diferentes aleaciones que se pueden realizar con otros materiales como cromo, níquel, fósforo, etc... Esta variedad de tipos permite que el acero sea un material muy versátil y utilizado pues para cada aplicación en concreto existe un tipo de acero específico para ella.

Esta diversidad de aceros se puede catalogar en 5 clases:

- Acero al carbono
- Acero aleado
- Acero de baja aleación ultrarresistentes
- Aceros inoxidables
- Acero de herramientas

### 2.1.2 Proceso de fabricación

Actualmente, el proceso de obtención de productos de acero se basa en el horno de arco eléctrico, dejando atrás el alto horno. Este cambio se debe a que el proceso actual permite obtener más productos con costes más bajos, y con una disminución de los impactos ambientales.

El proceso se basa en dos grandes fases, por un lado, la conocida como acería, y una segunda y posterior que es la laminación.

Acería (AA.VV. 2003).

En esta primera fase de acería, se contemplan diferentes etapas, como son:

- Elección de materias primas
- Fusión
- Afino
- Colada continua

Para la obtención del acero, la materia prima principal es la chatarra, ya que los procesos en el horno eléctrico permiten el uso de casi el 100% de ella, aunque se prevé que la media es del 85%. Esta materia prima debe contar con un alto nivel de control e inspección para poder obtener un acero de calidad, y su aptitud para ser utilizada vendrá marcada por tres factores, por su facilidad para ser cargada en el horno; por su conducta en la fusión, determinada por densidad, tamaño, espesor y forma de esta; y por su composición.

A la hora de seleccionar la chatarra, se forman tres grupos:

- Chatarra de transformación: resultante de fabricación de otros productos de acero
- Chatarra reciclada: con una alta calidad, y creada en la propia fabrica
- Chatarra de recuperación: la más abundante y obtenida del final de la vida útil de otros elementos.

Una de las etapas más importantes es la fusión de la materia prima, la cual se lleva a cabo en el horno eléctrico. Este está formado por un cilindro de chapa gruesa que contiene el acero fundido, cuenta además de paneles refrigerados por agua y por una bóveda que se desplaza para la carga de la chatarra.

Dicha bóveda cuenta con los orificios por los que se pasan los tres electrodos de grafito. Estos son los encargados de producir la corriente eléctrica, y se encuentran conectados a un transformador que aporta las condiciones de tensión e intensidad necesarias para ello. En la bóveda se encuentra un cuarto orificio por el cual se obtienen los gases de combustión que son filtrados para evitar que se contamine la atmósfera. Para vaciar el horno, y llevar a cabo el sangrado de la escoria, el horno cuenta con una estructura que lo soporta y oscila.

La fusión consiste en introducir los electrodos a la distancia precisa haciendo saltar el arco eléctrico, una vez se haya dispuesto la chatarra en el horno, con el fin de fundirla. Este proceso se repetirá hasta saturar el horno de material fundido.

El afino se lleva a cabo tanto en el horno eléctrico como en el horno cuchara, y lo que se busca con él, es el ajuste de la composición de la masa fundida a la deseada. En el horno se lleva a cabo el primer afino, eliminando impurezas y analizando la composición. Posteriormente se verterá en una cuchara, que será el recipiente de lo conocido como horno cuchara, que llevara a cabo la descarburación y acabará por ajustar la composición química de la masa en función del elemento final que se quiera producir.

La última etapa de la acería es la colada continua, en la cual, la cuchara una vez realizado el afino y con la composición química deseada se desplaza hasta una artesa donde se produce un vertido controlado de la masa en un molde con la forma del semiproducto que se quiere obtener, denominado en este caso palanquilla.

El acero líquido en la artesa se dispone en las diferentes vías de colada que cuentan con el molde que dará la forma, mediante su refrigeración con agua. Esta refrigeración se llevará a cabo mediante duchas de agua fría y aire. Posteriormente se cortará la palanquilla en las longitudes deseadas mediante sopletes.

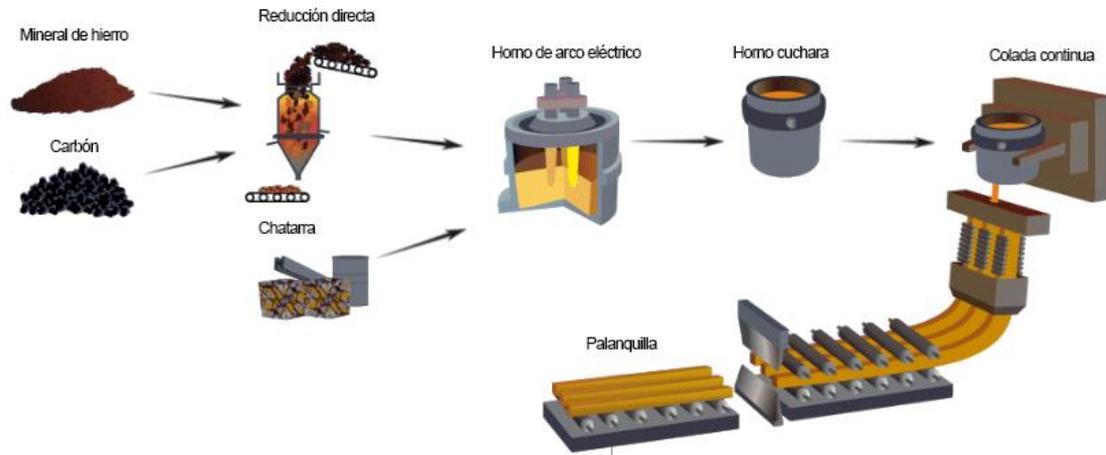


Figura 2.2. Esquema del proceso de acería.

Laminación (AA.VV. 2003).

Una vez obtenida la palanquilla, que cuenta con la composición química que se precisa, pero no con una forma óptima para ser comercializada, esta se debe trabajar para conformar el producto final. Esto consistirá en una laminación, también conocida como forja en caliente, en la que se obtiene productos de sección más reducida al pasar la palanquilla a cierta temperatura entre rodillos, obteniendo un producto final de sección constante.

Previamente a pasar las palanquillas por el tren de laminación, será necesario que alcancen una temperatura precisa para poder ser tratadas, está la adquieren dentro de los hornos de recalentamiento, que constan de tres partes: zona de precalentamiento, zona de calentamiento y zona de homogeneización. Una vez alcanzada la temperatura en toda la masa de la palanquilla, se transporta al tren de laminación.

Este tren consta de tres partes diferenciadas:

- Tren de desbaste: En esta parte se elimina de la palanquilla la posible capa de cascarilla que se puede haber formado durante su paso por el horno.
- Tren intermedio: En esta zona la palanquilla va reduciendo su sección, por medio de sucesivas pasadas entre rodillos.
- Tren acabador: Zona donde se obtiene la forma final del producto deseado, y en el caso de los corrugados donde se generan las corrugas de las barras.

Una vez obtenido el producto deseado se transportan para ser cortadas a medida y almacenadas.

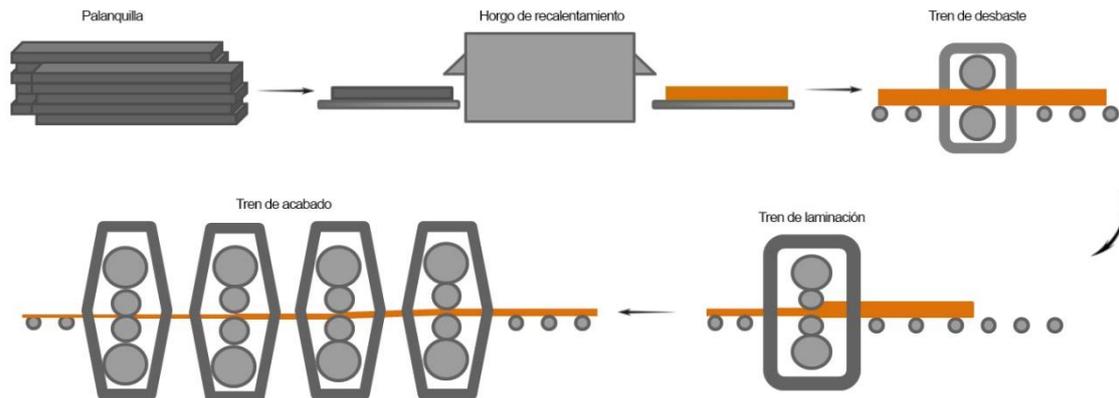


Figura 2.3. Esquema del proceso de laminación en caliente.

En algunos casos, el acero puede ser tratado en una tercera fase, conocida como laminación en frío. Este proceso comienza con un recocido o hipertemple, sometiendo a la varilla a altas temperaturas y posteriormente y de forma rápida a un enfriamiento con agua para evitar la aparición de lo conocido como corrosión intergranular. El siguiente paso consiste en eliminar la cascarilla generada durante el recocido, para ello se produce un ataque mediante ácidos, esta fase se conoce como decapado, generando una superficie limpia y pasivada. Por último, mediante una serie de rodillos se procede a la laminación a temperatura ambiente.

## 2.2 Acero Inoxidable

En la actualidad, este material está ganando cada vez más protagonismo debido sobre todo a sus óptimas prestaciones de durabilidad que presenta en comparación con el acero, en concreto, en su comportamiento frente a la corrosión, factor diferenciador entre ambos materiales. Se estima que el precio de la estructura puede aumentar sobre el precio final un 20% debido al mantenimiento y sustitución de armaduras de acero corroídas (AA.VV. 2003).

En sus inicios a principio del siglo XIX, el acero inoxidable se elaboraba en cantidades limitadas, primero como una aleación con níquel y posteriormente con cromo, presentando mayor resistencia a la corrosión (Durán Avilés, A.M. 2009-2012). Será en los años cercanos a la primera guerra mundial, cuando se produzca el desarrollo principal de lo que conocemos hoy. Países como Inglaterra, Alemania o Francia, desarrollaron diferentes tipos de aleaciones con cromo y níquel en porcentajes variables, logrando en todos los casos aceros resistentes a la oxidación. Posteriormente a la segunda guerra mundial, la inversión en innovaciones técnicas produjo un aumento del desarrollo de este material, marcado por una disminución de los costes de producción.

Su uso en nuestro país es escaso, ya que es un material joven, y el desarrollo de sus diferentes formatos ha seguido un curso progresivo y lento, siendo las barras corrugadas las últimas de este proceso. En todo el siglo XX, se ha mantenido como uno de los materiales protagonistas dentro de los sectores principales de la sociedad, como el transporte o la alimentación (ISSF, 2018).

En los últimos 40 años, se coloca a la cabeza de los materiales con mayor crecimiento medio anual, con un 5,39%, superando tanto al acero (2,35%) como al aluminio (3,90%), siendo este su mayor competidor (ISSF, 2018) (Tabla 2.1). Aunque la producción mayoritaria se debe al alambre en gran parte, las barras corrugadas, aumentan progresivamente.

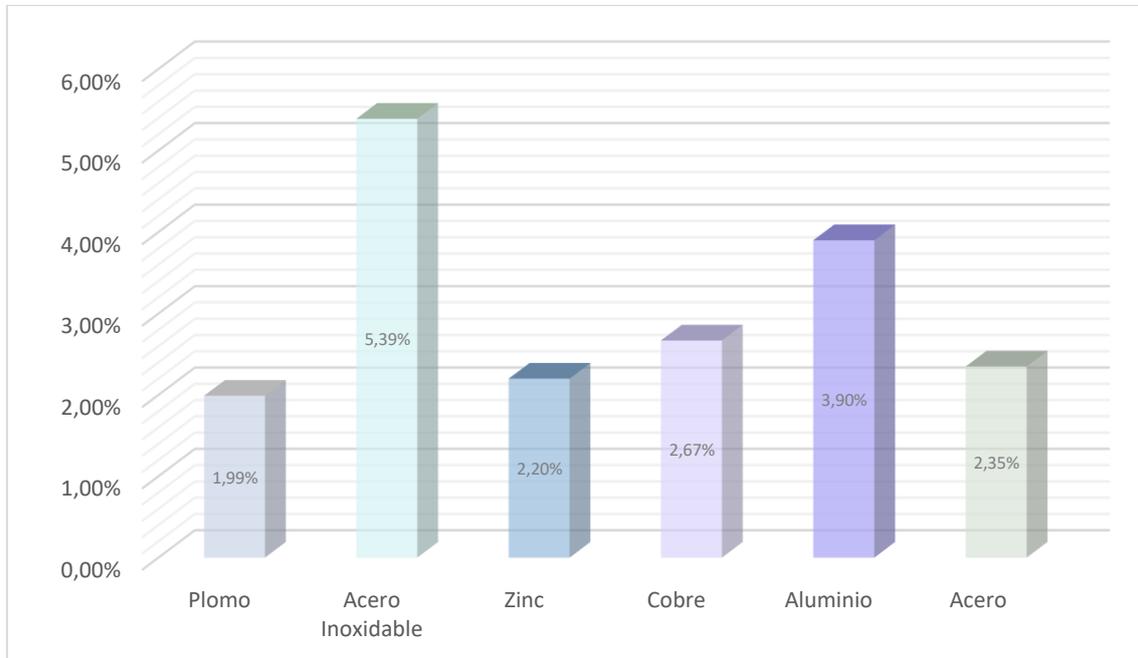


Tabla 2.1. Resumen del crecimiento medio anual de 1980 a 2017.

### 2.2.1 Composición

Atendiendo a la normativa española de acero inoxidable, UNE-EN 10088-1, se puede catalogar a un acero como inoxidable cuando contiene, al menos, un 10,5% de cromo y un máximo de 1.2% de carbono. Este contenido de cromo le permite generar una fina capa de óxido de cromo, que le protege y le hace resistente a la corrosión tanto a temperatura ambiente como frente ataques electroquímicos (AA.VV. 2003).

Un acero con una aleación solo de cromo puede sufrir oxidación por lo que generalmente aparecen otros elementos en la aleación, siendo los más importantes el molibdeno y el níquel. Este último mejora tanto las propiedades de la capa autoprotectora como las propiedades mecánicas.

La variedad tipológica de aceros inoxidables es muy amplia, ya que principalmente se pueden clasificar atendiendo a tres principios básicos, a partir de los cuales aparecen diferentes subgrupos.

Los tres principios básicos para catalogar y clasificar los aceros inoxidable, según la normativa UNE-EN ISO 10088-1: 2015, son:

- Las propiedades de principales.
- La microestructura.
- Los elementos principales de aleación.

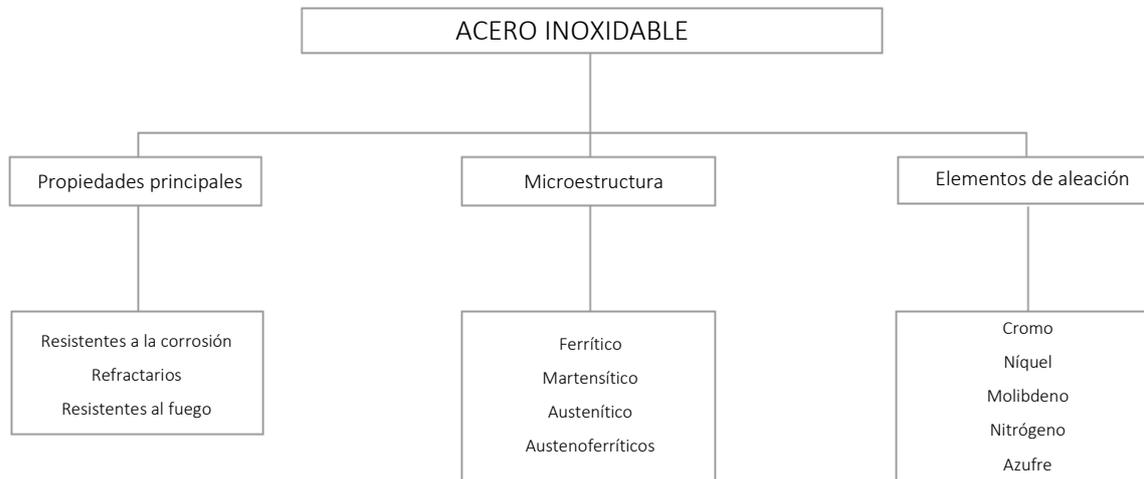


Figura 2.4. Esquema de la clasificación de los aceros inoxidable.

Los tipos de acero inoxidable más utilizados para aplicaciones estructurales son los aceros austeníticos y los austenoferíticos, los primeros presentan el 53% de la producción mundial, y su composición se basa generalmente entre un 16 y un 26% de cromo, más de un 6% de níquel, pudiendo llegar al 35%, y una concentración de carbono por debajo del 0,15% (AA.VV. 2003).

Los austenoferíticos o también denominados dúplex, por su parte, poseen una estructura bifásica, formada por ferrita y austenita. Su composición se basa en cromo en un porcentaje entre el 15,5 y el 28%, menos del 8% de níquel, entre 0,1 y 0,4 % de molibdeno, 0,03 de carbono y ocasionalmente otros aleantes (AA.VV. 2003).

Estos últimos, como refuerzo estructural están considerados como el avance más significativo en el sector de la construcción, ya que presentan mejores prestaciones que los austeníticos, tanto mecánicas como de durabilidad.

### 2.2.2 Proceso de fabricación

Las barras corrugadas de acero inoxidable se fabrican a través de un proceso de laminación en frío o en caliente, siguiendo el proceso homólogo al ya mencionado del acero tradicional. Este proceso es común para todos los tipos de acero, ya sea acero al carbono o cualquier aleación, como el acero inoxidable. La variante se encuentra en la disposición de las materias primas, siendo necesario un cierto contenido de cromo para obtener dicho acero inoxidable.

El proceso, como ya se ha descrito anteriormente, consta de las dos fases principales, como son la acería y la laminación en caliente. La primera etapa, es una fase común, en el que a partir de la materia prima se consigue la composición química deseada. Con la segunda etapa, gracias a las

altas temperaturas que se alcanzan en el horno de recalentamiento se consigue una reducción del diámetro y se le aporta su forma final.

Generalmente, algunos tipos de acero inoxidable como los austeníticos y dúplex pueden ser trabajados en la tercera fase ya mencionada de laminación en frío, con el objetivo de conseguir diámetros finos o propiedades mecánicas especialmente altas (AA.VV. 2003).

### 2.3 Polímeros reforzados con fibras (FRP)

Este tipo de materiales se encuentran en uso desde la década de los 40, en los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial, debido a los avances que generaron tanto el sector aeroespacial como el de la industria de defensa, pero que en la actualidad ha ido ganando cada vez más protagonismo. La aplicación de este tipo de materiales en el sector de la construcción aparece como barras corrugadas o laminas mayoritariamente, su aplicación como barras corrugadas para armar hormigón, se debe al gran potencial que ofrecen para ser utilizadas como alternativa al acero en situaciones donde las prestaciones que presenta se reducen.

Algunas de las ventajas que a priori ofrecen estos materiales compuestos en el ámbito de la construcción, son una alta resistencia a tracción y rigidez en relación con el peso, su capacidad de resistir la corrosión y el ataque químico, una expansión térmica controlable y unas condiciones de amortiguación y neutralidad electromagnética mayor a la de otros materiales. Estas características además pueden aportar una mayor seguridad y ciclo de vida (Almerich Julia, A. 2010).

Los FRP más utilizados en el ámbito de la construcción son el de carbono (CFRP), el de aramida (AFRP), el de vidrio (GFRP) y el de basalto (BFRP), aunque su uso como refuerzo de hormigón armado queda limitado por la poca cantidad de datos, guías de diseño, normas o códigos para su uso. Su desarrollo como barras de FRP, comienza en Estados Unidos en la década de los 60 y en la década de los 70 en Europa y Japón, aunque los estudios, investigaciones, y comercialización de estas tienen su gran auge a partir de la década de los 80 (Almerich Julia, A. 2010)

Aunque previamente a los años 80, se realizaron algunos estudios sobre el uso de corrugados de FRP en el ámbito de la ingeniería civil, no fue hasta esta década cuando de forma simultánea al aumento de las aplicaciones de estas barras en obras, se produce un gran desarrollo de la investigación sobre el uso y métodos de ensayo de estas (Almerich Julia, A. 2010). Estando a la cabeza de la investigación EE. UU., Japón, Canadá y algunos países europeos, como Italia o Noruega, con la realización de numerosas obras con este tipo de refuerzos y la creación de diferentes códigos o guías de diseño, de las que podemos destacar entre muchas otras, aquellas que han servido como base bibliográfica para este estudio.

- EEUU: *ACI 440.3R-04 (2004) "Guide for Test Methods for Fiber Reinforced Polymers (FRP) for Reinforcing and Strengthening Concrete Structures"*, ACI Committee 440, American Concrete Institute, Framington Hills, Mich.
- The Canadian Network of Centers of Excellence on intelligent Sensing for Innovative Structures : *Design Manual nº3, "Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers"*

- **Japón:** *Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1997 "Reccomentadion for Design and Constructioc of concrete Struttures Using Continuous Fiber Reinforced Materials", Concrete Engineering Series 23, ed. by A. Machida, Research Committe on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan, 325 p.*

### 2.3.1 Composición

Dentro de los diferentes tipos de barras corrugadas de FRP que podemos encontrar en el mercado, los dos tipos escogidos para ser objetos de estudio, análisis y comparación son las barras corrugadas de fibra de vidrio, y las barras corrugadas de fibra de basalto.

Los polímeros reforzados con fibra (FRP) son materiales compuestos, formados por un mismo esquema, por un lado, tenemos el material base o polímero (matriz), generalmente de mayor peso y sección, por otro lado, las fibras, material minoritario dentro del compuesto y que se encuentra embebido en la matriz (refuerzo).

En este compuesto tenemos, por tanto (Calvet Rodríguez, V. 2014):

- La matriz, como elemento continuo, con propiedades mecánicas limitadas y que actúa de aglomerante aportando cohesión a los refuerzos. Se pueden distinguir dos grandes grupos como son las termoestables y las termoplásticas. Las matrices más utilizadas son las resinas, de las cuales podemos hacer a su vez una distinción de tres tipos.
  - Resina poliéster: Caracterizada por su bajo coste, que junto con sus optimas prestaciones y maleabilidad la hacen la más utilizada.
  - Resina viniléster: Caracterizada por sus óptimas prestaciones en cuanto a resistencia química y a altas temperaturas. Pero como desventajas presenta una mayor contracción volumétrica respecto a otros tipos de resinas como epoxi durante el curado y además poseen un coste superior a las resinas poliéster.
  - Resina epoxi: Caracterizada por su alta resistencia a ataques químicos y sus buenas propiedades eléctricas. Como desventaja se atiende al coste, un 50% más alto que el de la resina poliéster.
- El refuerzo, generalmente fibras, es el elemento discontinuo y encargado de aportar a la composición las prestaciones mecánicas óptimas (Almerich Julia, A. 2010). Estas se desarrollarán con más detalle en los apartados siguientes, en concreto, las fibras de vidrio y de basalto.

Ahora bien, se debe establecer una sinergia entre ambos componentes para que el material compuesto pueda cumplir con los requisitos para los que ha sido fabricado, es decir, para poder absorber el conjunto de esfuerzos que va a sufrir.

Lo que se busca con el material compuesto es que el comportamiento del conjunto supere a la suma del comportamiento de cada uno de los elementos por separado. Por ello es por lo que la interacción entre matriz y fibra juega un papel fundamental en la determinación de la resistencia del material. Por tanto, aparece un "tercer factor" conocido como interfase, es decir, aquella zona de unión entre las distintas fases que forman el material, pudiendo llegar a tener más

importancia relativa que la naturaleza de la matriz y que las propiedades mecánicas de la fibra de refuerzo del material (Poveda, J. 2012).

### 2.3.1.1 Fibra de vidrio (GFRP)

Como se ha mencionado anteriormente, este tipo de materiales compuestos, se conforman de una matriz y un refuerzo (fibras). Estos GFRP, están compuestos por una matriz de resina que además de aglomerar las fibras, confiere una estabilidad dimensional a la barra, y por filamentos de fibra de vidrio, que aportan una alta resistencia a tracción y un alto módulo de elasticidad (Poveda, J. 2012).

El vidrio que se utiliza para la obtención de fibra de vidrio no tiene la misma composición que un vidrio común, presenta variaciones en su composición (Poveda, J. 2012). Esto se debe, por un lado, a la intención de dotar a las fibras de mayores prestaciones mecánicas, y por otro lado, al hecho de querer crear diferentes tipos de fibras con características diferenciadas.

Los tipos de fibra de vidrio más comunes son los siguientes (Almerich Julia, A. 2010):

- Tipo E (eléctrica): Una de las más utilizadas en la práctica actual, y se caracteriza por sus propiedades dieléctricas. A su vez, es la más económica de todas.
- Tipo R (reinforced): Junto con el tipo E, es la más utilizada actualmente, presenta mejores prestaciones en cuanto a resistencia, rigidez y menor deformación con respecto al tipo E.
- Tipo AS: Alternativa para minimizar la pérdida de sección y resistencia en ambientes alcalinos.
- Tipo C: Se caracteriza por su estabilidad química en entornos ácidos.

	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$TiO_2$	$B_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$Na_2O$	$K_2O$
Tipo E	55,00	14,00	0,20	7,00	22,00	1,00	0,50	0,30
Tipo C	66,00	4,00	-	5,00	14,00	3,00	7,50	5,00
Tipo S	65,00	25,00	-	-	-	10,00	-	-
Tipo AS	67,5	3,50	-	1,50	6,50	4,50	13,5	3,00

*\*Valores típicos*

*Tabla 2.2. Composición (% en peso) de los diferentes tipos de fibras de vidrio.*

### 2.3.1.2 Fibra de Basalto

La materia prima para producir la fibra de basalto es la roca basáltica. Esta se puede catalogar como una roca ígnea, volcánica, extrusiva y máfica. Esta clasificación se debe a diferentes factores, se trata de una roca ígnea volcánica debido a que se forma a partir del magma volcánico cuando este se enfría y se solidifica. Estas a su vez, se pueden clasificar en función de donde se solidifica y la composición química mayoritaria. Al enfriarse el magma fuera de la corteza terrestre, se considera extrusiva, y debido a la rapidez de enfriamiento de estas genera rocas con estructuras de grano fino. Ahora bien, la cantidad de silicatos “claros” y “oscuros” que poseen dichas rocas, las clasificarán en este caso, como roca máfica, puesto que están formadas en su mayoría por silicatos oscuros y calcio (Poveda, J. 2012).

A diferencia del vidrio, el hecho de que la roca basáltica sea de procedencia geológica se puede entender que la composición de la materia prima determinará las características fisicoquímicas y morfológicas en función del yacimiento de procedencia.

Es difícil conocer con exactitud cuál es el proceso por el que el magma se convierte en los diferentes tipos de rocas volcánicas, ya que dependen tanto de la composición química como de la velocidad de enfriamiento (Poveda, J. 2012).

Por tanto, el hecho de que el basalto sea una roca volcánica, que puede presentar una gran variedad de composiciones, hace difícil un control del proceso de fabricación de fibra de basalto. Por ello es, que es común que los fabricantes de fibra de basalto utilicen siempre el mismo yacimiento para extraer la materia prima.

	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$TiO_2$	$B_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$Na_2O$	$K_2O$	$Fe_2O_3$
<b>Basalto</b>	52,00	17,20	1,00	-	8,60	5,20	5,00	1,00	5,00

*\*Valores típicos*

*Tabla 2.3. Composición (% en peso) de las fibras de basalto.*

### 2.3.2 Proceso de fabricación

El proceso de fabricación de las barras corrugadas de fibra de vidrio y barras corrugadas de fibra de basalto, siguen las mismas fases, con alguna variación. Este proceso se puede dividir en dos partes, por un lado, la elaboración de las fibras y por otro lado la elaboración de la barra de refuerzo por combinación de las fibras con la resina.

Por tanto, en primer lugar se llevará a cabo la elaboración de las fibras, en el caso de las de vidrio, el proceso más utilizado se basa en la fusión directa. Este proceso consta de tres etapas (Poveda, J. 2012):

- Fusión: La materia prima molida se almacena en silos, y a través de una estación de carga y de un sistema transportador, se conduce hasta la zona de alimentación del horno principal. En este, se añade material reciclado en cantidades controladas, y se produce la fusión del vidrio a una temperatura de entre 1380 y 1550°C dependiendo del tipo de fibra de vidrio que se desee.
- Obtención de la fibra: Una vez fundido el vidrio, la masa sale del horno a través de unos canales denominados "forehearth". Posteriormente se transporta a lo conocido como "spinneret", un sistema de hilado en caliente, la masa pasa por una placa agujereada en caliente (1250°C) formando tiras de vidrio con diámetros de décimas de milímetro. Mediante un proceso de estirado en caliente se le dota a las fibras del diámetro final y mediante un proceso controlado de estiramiento y enfriamiento se le aporta las propiedades mecánicas.
- Bobinado: Una vez obtenidas las fibras, se le añaden componentes orgánicos que le aportan la protección necesaria para poder trabajar con las fibras en los procesos siguientes. Finalmente, las fibras forman hebras y mediante una estación tensora se procede al enrollado de estos.

El proceso por el cual se elaboran las fibras de basalto es análogo al anterior, con las variantes siguientes (Poveda, J. 2012):

- Fusión: Esta etapa es análoga, estando en este caso la temperatura de fusión en el intervalo de 1450 y 1600°C, en función de la composición de la roca.
- Obtención de la fibra: Es en esta etapa donde aparece la gran diferencia en el proceso de fabricación, la masa de basalto fundida, una vez sale del horno principal, se lleva a un segundo horno, conocido como horno de mantenimiento. En él se busca estabilizar la temperatura de la masa, con el objetivo de que no se rompa la fibra en el proceso de hilado. A la salida de este horno de mantenimiento se hará pasar la masa, al igual que la masa de vidrio, por el “spinneret”.
- Bobinado: Esta etapa es completamente igual en ambos procesos.

Ahora bien, una vez fabricadas las fibras, mediante el proceso de pultrusión se elaborarán las barras de refuerzo. Este proceso, sigue las mismas pautas para la producción de los dos tipos de barras.

El proceso de pultrusión es un proceso continuo similar al de extrusión, donde las fibras pasan por los diferentes elementos que conforman el proceso (Almerich Julia, A. 2010):

1. Dispensador de refuerzo: Consta de estanterías donde se sitúan las fibras de vidrio, generalmente agrupadas en filamentos continuos.
2. Impregnador de resina: Las fibras se sumergen en un baño de resina y aditivos necesarios.
3. Dado de preformado: una vez saturados completamente, se dirigen al dado de preformado, que sirve para eliminar el exceso de resina y dotarle de la posición deseada.
4. Dado de pultrusión: En él se produce el perfil final, se trata de una matriz de acero o cerámica que se calienta. Al pasar el material por él, se inicia la reacción de curado.
5. Dispositivo de tiro: Se sitúa en el espacio entre el dado de pultrusión y el dispositivo de tracción y generalmente se basa en un mecanismo de rodillos, en este dispositivo el producto se enfría.
6. Dispositivo de corte: Se basa en un dispositivo que previa programación corta el producto a la distancia deseada.

Este proceso permite obtener productos con un alto contenido de fibra, entre el 60% y el 80% en volumen (Almerich Julia, A. 2010), con una distribución homogénea de fibras en la sección transversal de la barra.

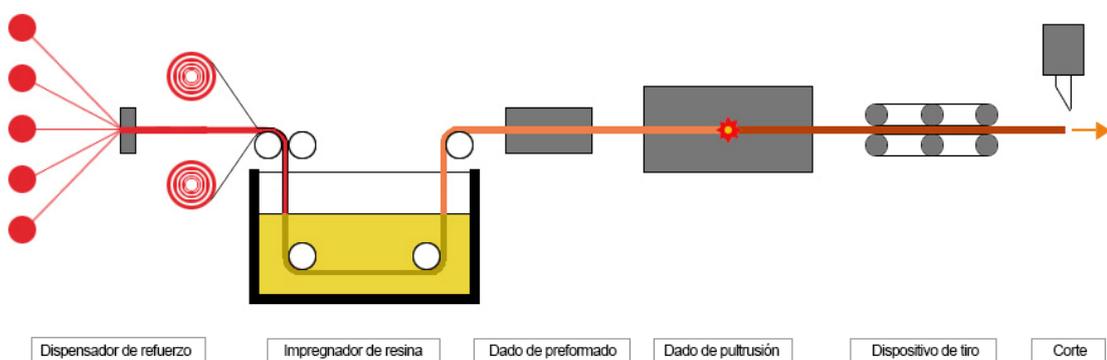


Figura 2.5. Esquema del proceso de pultrusión.



### 3. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO

---



### 3. Estudio del comportamiento mecánico

Como ya se ha adelantado, uno de los propósitos de este trabajo será el de estudiar mediante el análisis y comparación de ensayos propios, el comportamiento mecánico de cuatro tipos de barra corrugada de diferentes materiales para armar hormigón. Este estudio se estructura en dos partes, por un lado se ejecuta un estudio geométrico y ponderal, y posteriormente se desarrolla ensayos a tracción.

#### 3.1 Material y métodos

##### 3.1.1 Muestras

Las barras corrugadas que se han seleccionado para llevar a cabo los diferentes ensayos son de cuatro materiales diferentes: Acero, acero Inoxidable, fibra de vidrio y fibra de Basalto.

La elección de estos cuatro tipos de materiales se encuentra marcada, por un lado, por la disponibilidad y facilidad de la obtención de muestras, y por otro lado, por el interés que traen consigo cada uno de ellos, teniendo en cuenta tanto aspectos mecánicos como sostenibles.

Las muestras escogidas de cada uno de los materiales han sido cuatro con la intención de poder obtener suficientes datos para analizar y comparar con mayor precisión, reduciendo al mínimo la dispersión de los resultados. A su vez se han seleccionado con un mismo diámetro y dimensión, con el fin de establecer una comparación de resultados bajo unas condiciones similares. El diámetro seleccionado ha sido de 6 mm, debido a la disponibilidad que presenta en los diferentes materiales, así como a las necesidades marcadas por los diferentes aparatos de ensayo, por esto último, la longitud de las muestras es de 60 mm, excepto los corrugados reforzados de fibra de basalto que tienen una longitud de 50 mm.



Figura 3.1. Muestras de estudio.

La denominación para cada una de las barras de los diferentes materiales se ha basado en el tipo de material para diferenciarlas, y en un orden numérico para distinguirlas dentro de cada uno de los materiales.

#### Barras corrugadas de acero

Para este trabajo, las barras de acero que se han empleado son barras corrugadas de acero tipo B 500 SD, ya que son las más utilizadas actualmente en el sector de la construcción en el ámbito estructural. Aun así, el inconveniente principal que surgió a la hora de obtenerlas fue fruto del diámetro, ya que este al ser tan bajo fue difícil de encontrar como barra, siendo el formato de malla donde más se utiliza este diámetro.

Las muestras han sido facilitadas por la empresa Bigator S.L, cuyo suministrador y fabricante de este tipo de productos es G.P. Manufacturas del Acero S.A.

La denominación para estas barras se compone de la primera letra del material (A de acero) y un número siguiendo el orden de 1,2,3,4. Por tanto las muestras se citarán como A1, A2, A3, A4.

<i>R<sub>m</sub></i> (MPa)	<i>R<sub>p 0,2%</sub></i> (MPa)	<i>A</i> (%)	<i>Normativa</i>
≥500	≥550	>7,5	UNE-EN 10080

Tabla 3.1. Características de las barras corrugadas de acero definidas por el fabricante.

#### Barras corrugadas de acero inoxidable

Estas barras han sido escogidas, entre otras razones, por las diferentes ventajas que presentan respecto al acero tradicional, sobre todo en lo referente a la corrosión de estas, como ya se ha mencionado anteriormente.

Las barras de acero inoxidable son de un acero austenítico cuya designación es 1.4301, código ACX 125 y su equivalente en la norma AISI es AISI 304, además es preciso destacar que han sufrido un proceso de laminación en frío, lo cual hace esperar que se obtengan resistencias elevadas.

Estas han sido suministradas por la empresa de materiales de construcción Grapamar S.L. distribuidores de Acerinox S.A, un grupo empresarial que se encuentra a la cabeza en el mercado del acero inoxidable tanto nacional como internacionalmente, siendo fabricadas por una de sus fábricas en España, Roldan S.A.

La denominación para estas barras, con la intención de no repetir una designación similar a las de acero, se compone de la primera letra del tipo de acero (I de inoxidable) y un número siguiendo el orden de 1,2,3,4. Por tanto las muestras se tratarán como I1, I2, I3, I4.

<i>R<sub>m</sub></i> (MPa)	<i>R<sub>p 0,2%</sub></i> (MPa)	<i>A</i> (%)	<i>Normativa</i>
≥660	≥600	> 12	BS 6744

Tabla 3.2. Características de las barras corrugadas de acero inoxidable definidas por el fabricante.

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
< 0,070	< 0,75	< 2,00	< 0,045	< 0,030	< 110	18,0 - 19,0	8,0 – 9,0

Tabla 3.3. Composición química de las barras corrugadas de acero inoxidable definidas por el fabricante.

#### Barras corrugadas de fibra de vidrio

Estas barras de polímeros reforzadas con fibras de vidrio llevan un tiempo breve en el mercado intentando competir con los materiales tradicionales por lo que resulta preciso, conocer y estudiar sus prestaciones. Las barras de fibra de vidrio fueron obtenidas a partir de la empresa Fivicor, una empresa española con más de 30 años de experiencia en el sector, fabricando este tipo de productos.

La denominación para estas barras se compone de la primera letra del material (V de vidrio) y un número siguiendo el orden de 1,2,3,4. Por tanto las muestras se citarán como V1, V2, V3, V4.

Rm (MPa)	Rp 0,2% (MPa)	A (%)	Normativa
> 420	-	> 1,2	UNE 6892

Tabla 3.4. Características de las barras corrugadas de fibra de vidrio definidas por el fabricante

#### Barras corrugadas de fibra de basalto

Las barras reforzadas con fibra de basalto se encuentran todavía en desarrollo, y sin abundantes aplicaciones en el sector de la construcción dentro de nuestro país. A su vez tienen que competir con barras de polímeros reforzados con otros tipos de fibra, como fibra de vidrio o de carbono, debido a esto resulta atractivo estudiar este producto tan joven.

Las muestras fueron suministradas por la empresa Basaltec S.L. quienes se encuentran actualmente realizando todos los ensayos y pruebas necesarias para obtener los certificados pertinentes para poder comercializar dichos productos en el mercado nacional.

La denominación para estas barras se compone de la primera letra del material (B de basalto) y un número siguiendo el orden de 1,2,3,4. Por tanto las muestras se citarán como B1, B2, B3, B4.

Rm (MPa)	Rp 0,2% (MPa)	A (%)	Normativa
> 310	-	> 2	ACI 440.3R-04

Tabla 3.5. Características de las barras corrugadas de fibra de basalto definidas por el fabricante

### 3.1.2 Métodos experimentales

A partir de una serie de métodos regidos y delimitados por un conjunto de normativas se obtendrán datos y parámetros de las diferentes muestras, estos serán posteriormente analizados y comparados. Como se ha mencionado, se desarrollará inicialmente un estudio geométrico y ponderal de las barras, cuyos resultados servirán para llevar a cabo los ensayos a tracción.

#### 3.1.2.1 Estudio geométrico y ponderal

Mediante este estudio se pretende conocer mejor la geometría de cada una de las muestras, a pesar de que los cuatro tipos de barras sujetas a estudio no poseen la misma composición, este método se realizara bajo la misma normativa para todas, puesto que en la actualidad no se ha establecido una normativa específica para el estudio geométrico de las barras FRP, ya que todavía no se han estandarizado estas como refuerzo del hormigón.

Guiados por las consideraciones establecidas por la normativa se podrá obtener datos acerca de las características geométricas y ponderales de las barras como el diámetro real, la masa por metro lineal y el área de la sección transversal. Además, puesto que las barras corrugadas se caracterizan por las dimensiones, número y configuración de las corrugas transversales y longitudinales, será preciso conocer las características geométricas del corrugado: altura, separación e inclinación de las corrugas. Por tanto, la normativa que conducirá este ensayo será la propia del acero como elemento de armado para el hormigón, UNE-EN ISO 15630 y UNE 36065, esta última complementaria a la norma UNE-EN 10080. Cabe mencionar que debido a las diferentes composiciones de las muestras de estudio, algunas de las características de los elementos FRP no podrán estar limitadas por los intervalos establecidos en la normativa.

Para determinar los diferentes valores mencionados según lo dispuesto en la normativa se aplicarán las siguientes consideraciones:

- **Diámetro real:** Según la norma, el diámetro real no puede ser inferior al 95% del diámetro nominal, como en el estudio se toman muestras con un diámetro nominal de 6 mm, el diámetro real no podrá ser inferior a 5,7 mm.

Para calcularlo se medirá el diámetro de la barra en 3 puntos diferentes de ella, tomando de cada punto dos medidas, girando 90°. De estas dos medidas se obtendrá el valor medio, y posteriormente se obtendrá el valor medio de los valores medios obtenidos en cada uno de los puntos.

- **Masa real:** En función del diámetro nominal la normativa establece unas medidas nominales de masa, que pueden tener como máximo una tolerancia de  $\pm 4,5 \%$ , siendo el valor de referencia en nuestro caso de 0,222 kg/m. La longitud mínima de la muestra no debe ser inferior a 500 mm siendo la longitud de todas las muestras a estudiar superior a esta.

Para el cálculo se usará la siguiente ecuación:

$$m = \frac{P}{L}$$

- **Área de sección equivalente:** Este valor depende de la masa real y la longitud de la barra. Su valor se obtendrá de la ecuación:

$$S = \frac{127,389 \cdot m}{L}$$

- **Altura de corrugas transversales:** Distancia entre el punto más alto de la corruga y el núcleo de la barra.

Se tomará como altura de corruga el valor medio de las alturas de tres corrugas medidas en la barra. La norma establece un intervalo de tolerancia que se debe cumplir, debiendo estar este valor medio dentro del intervalo  $0,03 d - 0,15 d$ , siendo  $d$  el diámetro nominal el intervalo que se deberá tener en cuenta en nuestro estudio será de  $0,18 - 0,9$  mm.

- **Separación de corrugas:** Distancia entre el centro de una corruga hasta el centro de la corruga consecutiva.

La norma establece que para determinar esta distancia se debe medir la distancia entre 11 corrugas y dividirlo por el número de huecos, es decir, 10. Ahora bien, esta distancia debe quedar comprendida dentro del intervalo de  $0,4 d - 1,2 d$ , siendo en nuestro caso  $2,4 - 7,2$  mm.

- **Inclinación de corrugas:** Se trata del ángulo que se genera entre el eje longitudinal de la barra y la línea de proyección en la dirección de la corruga. En el caso de que existan dos corrugas.

Para poder apreciar esa inclinación correctamente y así proceder a su cálculo, se debe obtener el desarrollo impreso de las corrugas. La normativa cita una solución óptima, para poder observar dicho desarrollo, como es hacer rodar la barra sobre un papel en blanco junto a un papel de calco. De esta forma se podrá observar el dibujo de las corrugas y mediante un transportador de ángulos, medir dicha inclinación.

Al igual que en los otros casos, se establece un intervalo en el cual debe quedar recogido dicho ángulo, este será de  $35^\circ$  a  $75^\circ$ .

Para llevar a cabo este ensayo geométrico y ponderal, el procedimiento es sencillo, únicamente se han de seguir las consideraciones anteriormente descritas y el instrumental necesario será:

- Báscula de precisión METTLER PJ 12.
- Transportador de ángulos.
- Pie de rey
- Papel de calco

- Barras corrugadas de acero, acero inoxidable, fibra de vidrio y fibra de basalto, de 6 mm de diámetro y una longitud entre 50 y 60 cm.

### 3.1.2.2 Ensayo a tracción

Este método de estudio permite conocer algunas de las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de barras, sometiéndolas a un esfuerzo axial de tracción hasta su rotura. Este proceso al igual que el anterior, está condicionado y marcado por una normativa, en cuanto a barras de acero y acero inoxidable se refiere, pero actualmente todavía no existe una normativa estandarizada en nuestro país para las barras FRP.

Como se ha citado anteriormente, existen muchas guías de diseño o códigos para su uso que no tienen un carácter normativo, sino que son recomendaciones basadas en las repetidas investigaciones realizadas en otros países. Por ello, para obtener los datos pertinentes del ensayo a tracción de las diferentes barras FRP, se atenderá a las consideraciones marcadas por la ACI 440.3R-04 B.2 *“Test method for longitudinal tensile properties of FRP bars”*, mientras que para estudiar el comportamiento a tracción de las barras corrugadas tanto de acero como de acero inoxidable se contemplarán las indicaciones marcadas por las normas UNE-EN ISO 15630-1 y UNE-EN ISO 6892-1.

La diferencia que existe entre ambas normativas, como así se refleja en la ACI 440.3R-04, radica en la composición de las distintas barras, su composición determina su comportamiento frente a diferentes acciones debido a que las barras de FRP al igual que otros materiales como la madera tienen un comportamiento anisotrópico, causa de su estructura de fibras. Esto hace que a la hora de estudiar barras FRP, se deban tener en cuenta ciertas consideraciones que en el caso de las de acero no son pertinentes.

Fundamentalmente la consideración que se debe tener en cuenta a la hora de realizar ensayos con barras FRP, se basa en la protección de los extremos con un sistema de anclajes, ya que cuando son agarrados por la máquina de ensayo, debido a la baja resistencia a cortante que poseen se produce el fallo por aplastamiento de los extremos de las muestras. Por ello es necesario un diseño preciso de dichos anclajes, siendo importante la longitud de anclaje que dependerá del comportamiento adherente de la barra.



Figura 3.2. Barra FRP dispuesta con los anclajes de sujeción.

El instrumental necesario para desarrollar el ensayo a tracción se reduce principalmente a una máquina electromecánica universal IBEREST modelo STIB – 200/W. La máquina ira conectada a un ordenador, que posee un software mediante el cual se introducirán los parámetros de ensayo,

como datos de la muestra o velocidad de carga. Una vez realizado el ensayo, el ordenador recogerá y calculará los resultados deseados, y emitirá un informe resumen de la prueba.



Figura 3.3. Máquina electromecánica universal IBEREST modelo STIB – 200/W.

El procedimiento teórico y la metodología que se debe seguir para realizar un ensayo a tracción es el siguiente:

1. Obtención de las muestras que se precisa ensayar.
2. Preparación de las muestras, en función de las consideraciones de las diferentes normativas.

En el caso de las barras de FRP, se deberán elaborar los anclajes, en condiciones de laboratorio ( $23 \pm 2$  °C y  $50 \pm 10\%$  H.R.) (Calvet Rodríguez, V. 2014), estos en la mayoría de los casos consisten en un tubo con un tapón inferior, que se coloca en el extremo de la barra y se rellena de resina epoxi para fijar correctamente la barra. Esta resina debe ser elaborada bajo una dosificación preestablecida por la normativa y deberá ser vibrada para distribuirla homogéneamente por el interior del tubo para evitar que se quede aire en el interior. Será muy importante que las barras estén perfectamente alineadas con los

anclajes. La resina deberá ser curada durante 48 h en condiciones de laboratorio de  $23 \pm 2$  °C y  $50 \pm 10\%$  H.R.

A su vez, tal y como marcan las normativas previamente a ser ensayadas, cada una de las muestras deben ser marcadas por pequeños trazos para el posterior análisis del alargamiento. Estas deberán estar dispuestas a una distancia de cinco veces el diámetro de la probeta.

3. Encendido de la máquina y posterior iniciación del software.
4. Colocación de las probetas en las mordazas. Estas deben estar limpias para evitar el escurrimiento.
5. Configuración de la máquina y ensayo.
  - Longitud libre
  - Longitud de la muestra
  - Velocidad de ensayo
  - Identificación del ensayo
  - Material de ensayo

Puesto que la ACI 440.3R-04 no determina una velocidad de ensayo concreta, solo establece que debe romper de 1 a 10 minutos, se utilizará la velocidad que se determina en la normativa de ensayos a tracción para elementos de acero, UNE-EN ISO 6892, estando está en el intervalo definido entre 6 a 60 MPa/segundos.

6. Una vez realizados todos los pasos anteriores, se puede iniciar el ensayo.
7. Acabado el ensayo, se debe guardar todos los datos obtenidos y obtener el informe.
8. A partir de los datos característicos obtenidos a través de la tecnología, se pueden obtener diferentes datos mediante el cálculo manual, como así se especifica en ambas normativas.

El ensayo a tracción nos permite obtener diferentes datos característicos de los diferentes materiales, que mediante su análisis nos facilitan conocer mejor el comportamiento estructural de los mismos.

Los datos obtenidos a través de los instrumentos de ensayo a tracción son:

- Carga de rotura (Fr)
- Carga máxima (Fm)
- Diagrama fuerza-deformación

A partir de los datos anteriores y de los datos obtenidos del estudio geométrico y ponderal, se pueden obtener mediante cálculo el límite elástico convencional, la resistencia a tracción y el alargamiento. Estos datos nos servirán para llevar a cabo el análisis y comparación de las diferentes muestras:

- Límite elástico convencional al 0,2%: Definido por la normativa UNE-EN ISO 6892, como la carga unitaria a la que corresponde un alargamiento no proporcional igual al 0,2%, medida en MPa.

Para obtenerlo, se debe atender al diagrama fuerza-extensión, trazando una línea paralela a la parte recta de la curva. El punto donde esta nueva línea cruce con la curva, proporciona el valor de la carga correspondiente al límite elástico convencional deseado. Para obtenerlo, se deberá dividir el valor de dicha carga entre el área de sección transversal inicial de la muestra.

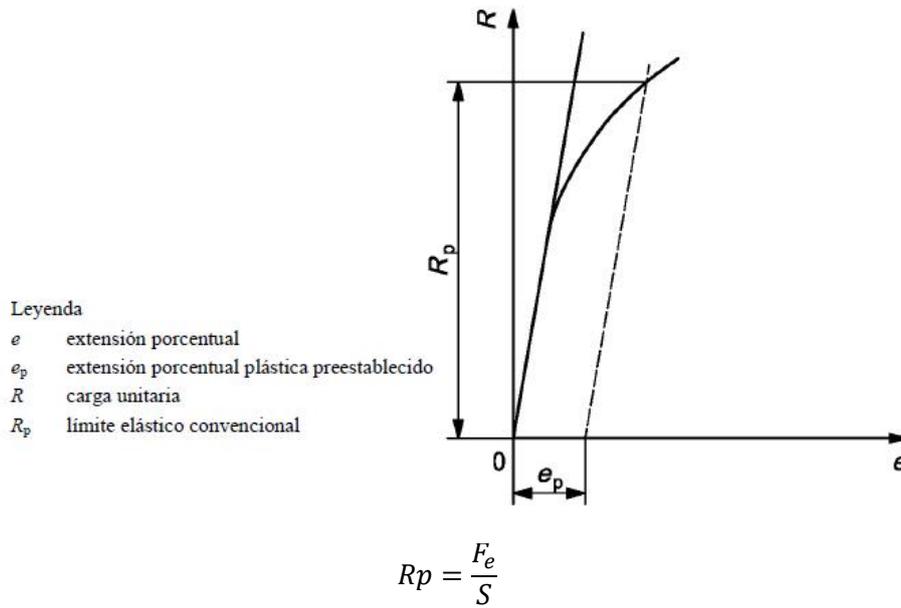


Figura 3.4. Diagrama límite elástico convencional.

- Resistencia a tracción: Se define por la normativa como la carga unitaria correspondiente a la carga máxima que soporta la muestra en el ensayo, medida en MPa.

La carga unitaria se define por tanto como cociente entre el valor de la carga y el área de sección transversal inicial de la probeta. Por tanto, se calculará con la siguiente fórmula:

$$R_m = \frac{F_m}{S}$$

Se deberá tener en cuenta que tanto las barras GFRP como las barras BFRP, tienen un comportamiento frágil, por lo que, su resistencia máxima se puede definir igual que su resistencia de rotura. Por tanto:

$$R_m = \frac{F_r}{S}$$

Además, tanto en las normativas propias de los materiales FRP, ACI 440. 1R-06, como en la del acero y acero inoxidable UNE-EN 10080, se establece la fórmula para obtener el valor característico de la resistencia mecánica, con un nivel de confianza del 95%.

$$R_{m_{ck}} = R_m - (3 \times \delta)$$

- Alargamiento: Los diferentes alargamientos que se pueden definir durante todo el proceso del ensayo a tracción son:

- Alargamiento plástico porcentual bajo carga máxima ( $A_g$ )

$$A_g = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

- Alargamiento total porcentual bajo carga máxima ( $A_{gt}$ )

$$A_{gt} = A_g + \frac{R_m}{E} \times 100$$

- Alargamiento total porcentual de rotura ( $A$ )

$$A = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100$$

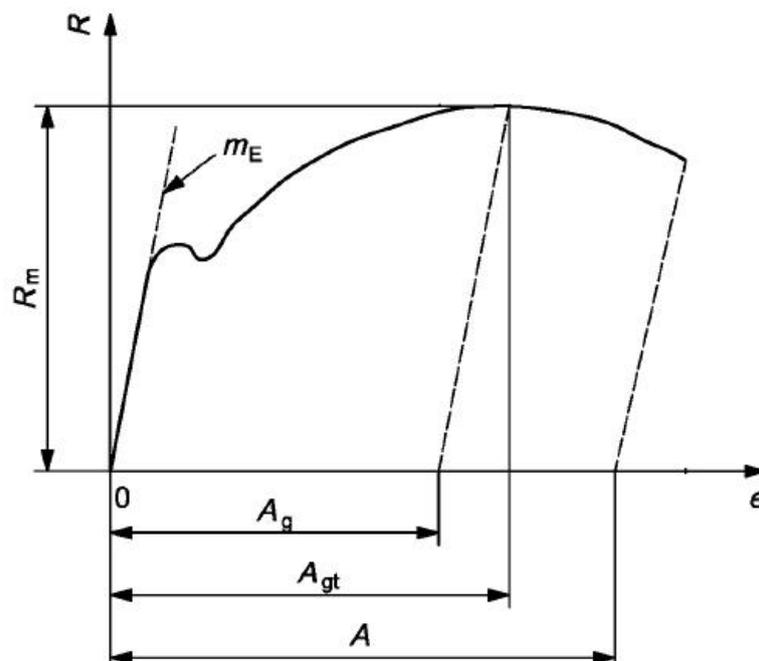


Figura 3.5. Diagrama alargamientos y resistencia a tracción.

### 3.2. Desarrollo experimental y resultados

En ese apartado se presenta el desarrollo de los diferentes ensayos descritos en el apartado anterior, así como los problemas que han surgido a lo largo de ellos. A su vez, se muestran los resultados obtenidos de los diferentes métodos.

#### 3.2.1 Estudio geométrico y ponderal

Este método nos va a permitir obtener características geométricas de las muestras de estudio, que servirán tanto para conocer mejor los materiales, como a la hora de realizar otros ensayos, como el de tracción.

El criterio que se ha seguido para desarrollar este estudio es idéntico para todas las barras de corrugado, basado en lo establecido en las normativas UNE-EN ISO 15630 y UNE 36065, siguiendo las consideraciones anteriormente citadas en el apartado 3.2.1.

A continuación, se muestran los datos obtenidos del estudio geométrico y ponderal de cada uno de los tipos de barras corrugadas.

#### *Barras corrugadas de acero*

Barra	A1	A2	A3	A4
Diámetro real (mm)	5,816	5,87	5,93	5,92
Diámetro nominal (mm)	6	6	6	6
Masa real (kg/m)	0,218	0,217	0,218	0,218
Área sec. Transversal (mm)	27,76	27,74	27,76	27,79
Altura máx. Corrugas (mm)	0,383	0,383	0,316	0,383
Separación corrugas (mm)	4,35	4,40	4,35	4,40
Inclinación corrugas (°)	B <sub>1</sub> =70° B <sub>2</sub> =48°	B <sub>1</sub> =68° B <sub>2</sub> =48°	B <sub>1</sub> =66° B <sub>2</sub> =52°	B <sub>1</sub> =64° B <sub>2</sub> =48°

Tabla 3.6. Resultados del ensayo geométrico y ponderal a barras corrugadas de acero.

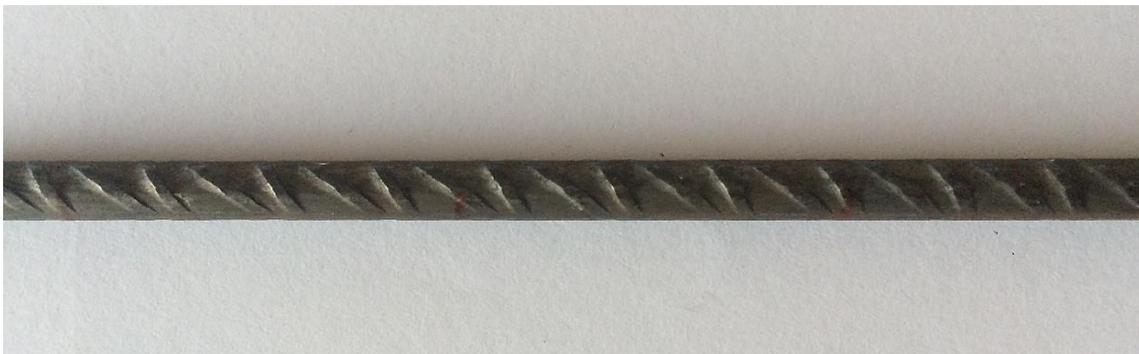


Figura 3.6. Barra corrugada de acero.

Barras corrugadas de acero inoxidable

Barra	I1	I2	I3	I4
Diámetro real (mm)	5,93	5,93	5,97	5,96
Diámetro nominal (mm)	6	6	6	6
Masa real (kg/m)	0,215	0,214	0,215	0,215
Área sec. Transversal (mm)	27,39	27,26	27,38	27,39
Altura máx. Corrugas (mm)	0,50	0,55	0,53	0,56
Separación corrugas (mm)	5,20	5,10	5,10	5,10
Inclinación corrugas (°)	B <sub>1</sub> =65°	B <sub>1</sub> =63°	B <sub>1</sub> =62°	B <sub>1</sub> =67°

Tabla 3.7. Resultados del ensayo geométrico y ponderal a barras corrugadas de acero inoxidable.

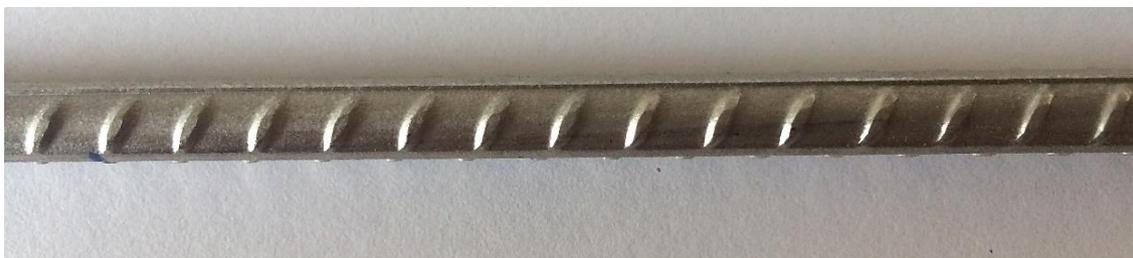


Figura 3.7. Barra corrugada de acero inoxidable.

Barras corrugadas reforzadas por fibra de vidrio

Barra	V1	V2	V3	V4
Diámetro real (mm)	5,88	5,80	5,741	5,775
Diámetro nominal (mm)	6	6	6	6
Masa real (kg/m)	0,040	0,050	0,049	0,050
Área sec. Transversal (mm)	27,15	26,42	25,88	26,19
Altura máx. Corrugas (mm)	0,166	0,33	0,30	0,13
Separación corrugas (mm)	15,20	19,80	17,40	17,40
Inclinación corrugas (°)	B <sub>1</sub> =55°	B <sub>1</sub> =47°	B <sub>1</sub> =49°	B <sub>1</sub> =49°

Tabla 3.8. Resultados del ensayo geométrico y ponderal a barras corrugadas de fibra de vidrio.



Figura 3.8. Barra corrugada GFRP.

Barras corrugadas reforzadas por fibra de basalto

Barra	B1	B2	B3	B4
Diámetro real (mm)	7,116	7,05	7,15	6,78
Diámetro nominal (mm)	6	6	6	6
Masa real (kg/m)	0,083	0,082	0,085	0,080
Área sec. Transversal (mm)	39,77	39,03	40,15	36,10
Altura máx. Corrugas (mm)	0,583	0,716	0,516	0,50
Separación corrugas (mm)	16,00	15,80	15,80	15,60
Inclinación corrugas (°)	B <sub>1</sub> =61°	B <sub>1</sub> =60°	B <sub>1</sub> =60°	B <sub>1</sub> =58,5°

Tabla 3.9. Resultados del ensayo geométrico y ponderal a barras corrugadas de fibra de basalto.

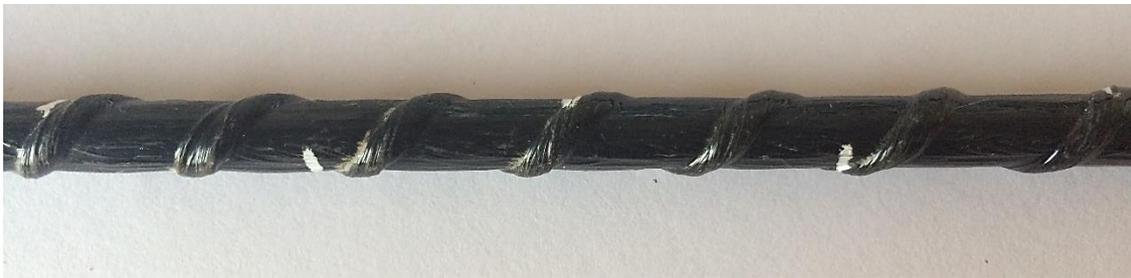


Figura 3.9. Barra corrugada BFRP.

### 3.2.2 Ensayo a tracción

Tomando como referencia las directrices teóricas marcadas en el *apartado 3.1.2.2*, se desarrollaron las pruebas a tracción de las diferentes barras de cada material. Ahora bien, debido a la falta de instrumental y recursos, para llevar a cabo algunas de las consideraciones marcadas en ese proceso teórico, surge una problemática a la hora de realizar algunos ensayos, que serán descritos en los siguientes apartados.

#### 3.2.2.1 Barras corrugadas de acero

Los cuatro ensayos correspondientes a las cuatro muestras de acero tuvieron un desarrollo típico, ya que no existe ninguna consideración especial a la hora de proceder a su ensayo. Las muestras fueron ensayadas en orden descendente a su designación, A4, A3, A2, A1.

El único aspecto distintivo entre los ensayos es la velocidad de carga, ya que en la primera muestra (A4), la velocidad es de 6 MPa/s, mientras que en el resto esta asciende a 24,78 MPa/s. Esta variación se debe a que se consideró oportuno dicho incremento con la intención de observar si existe alguna variación en el comportamiento, así como para reducir el tiempo de ensayo.

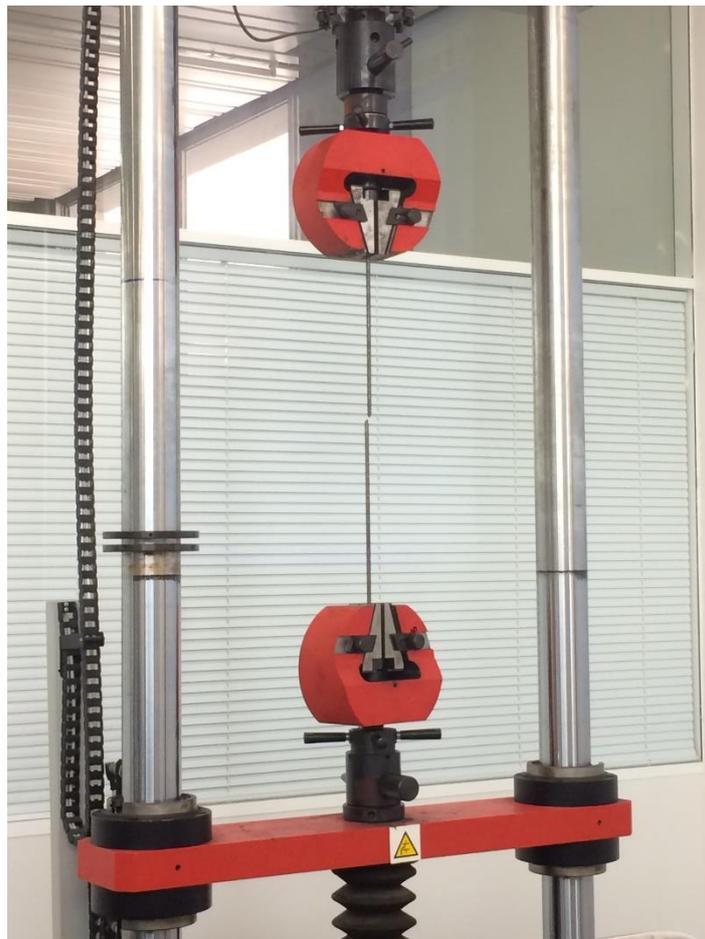


Figura 3.10. Ensayo a tracción barra corrugada de acero.

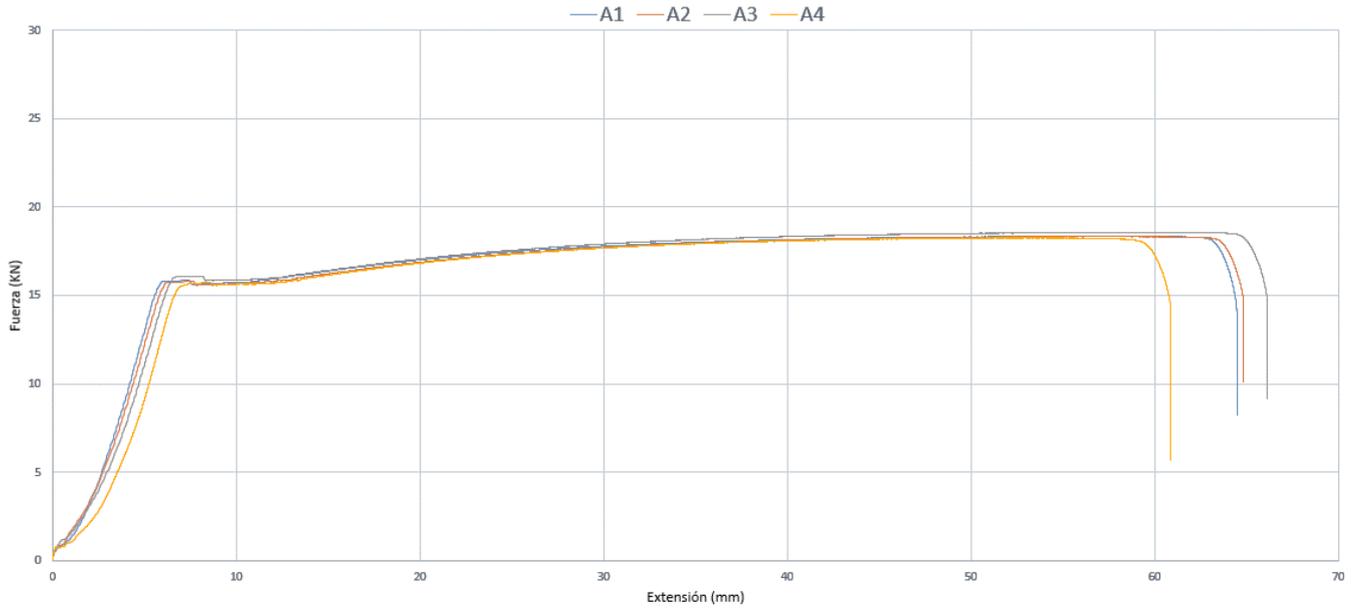


Figura 3.11. Diagrama Fuerza-extensión del ensayo a tracción de las barras corrugadas de acero.

Barra	A1	A2	A3	A4
Velocidad (MPa/s)	24,78	24,78	24,78	6,00
Distancia libre (mm)	483,00	490,0	498,00	453,00
Fr (Kn)	13,82	13,94	14,58	14,24
Fm (Kn)	18,36	18,34	18,57	18,27
Rr (MPa)	497,83	502,52	525,21	512,41
Rm (MPa)	661,38	661,13	668,94	657,43
Rp <sub>0,2%</sub> (MPa)	569,88	567,77	578,89	563,51
Ag (%)	10	13,33	15	8,33
Agt (%)	10,31	13,64	15,31	8,64
A (%)	25	23,33	23,33	23,33

Tabla 3.10. Resultados del ensayo a tracción a barras corrugadas de acero.

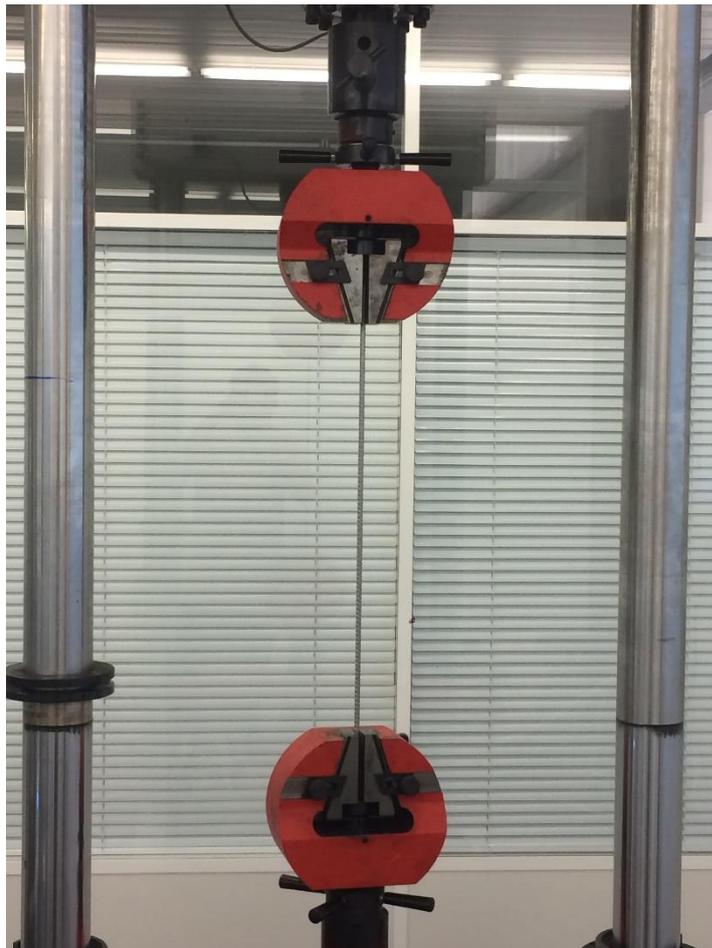
Rm (MPa)	$\delta$	Rm <sub>ck</sub> (MPa)	Rp <sub>0,2%</sub> (MPa)	$\delta$	Agt (%)	$\delta$	A (%)	$\delta$
662,22	4,18	649,68	570,01	5,615	11,975	2,63	23,74	0,722

Tabla 3.11. Resultados medios y característicos del ensayo a tracción de barras corrugadas de acero.

### 3.2.2.2 Barras corrugadas de acero inoxidable

Del mismo modo que en el caso anterior, el desarrollo de las cuatro pruebas tiene un curso en condiciones normales. Las barras siguen el mismo orden de ensayo que las de acero al carbono, en orden decreciente a su numeración: I4, I3, I2, I1.

Al mismo tiempo, y de forma análoga a los ensayos anteriores, la única diferencia entre muestras en el procedimiento de ensayo se encuentra en la velocidad, ya que se utilizan tres velocidades diferentes para estudiar si existe o no variación en el comportamiento.



*Figura 3.12. Ensayo a tracción barra corrugada de acero inoxidable.*

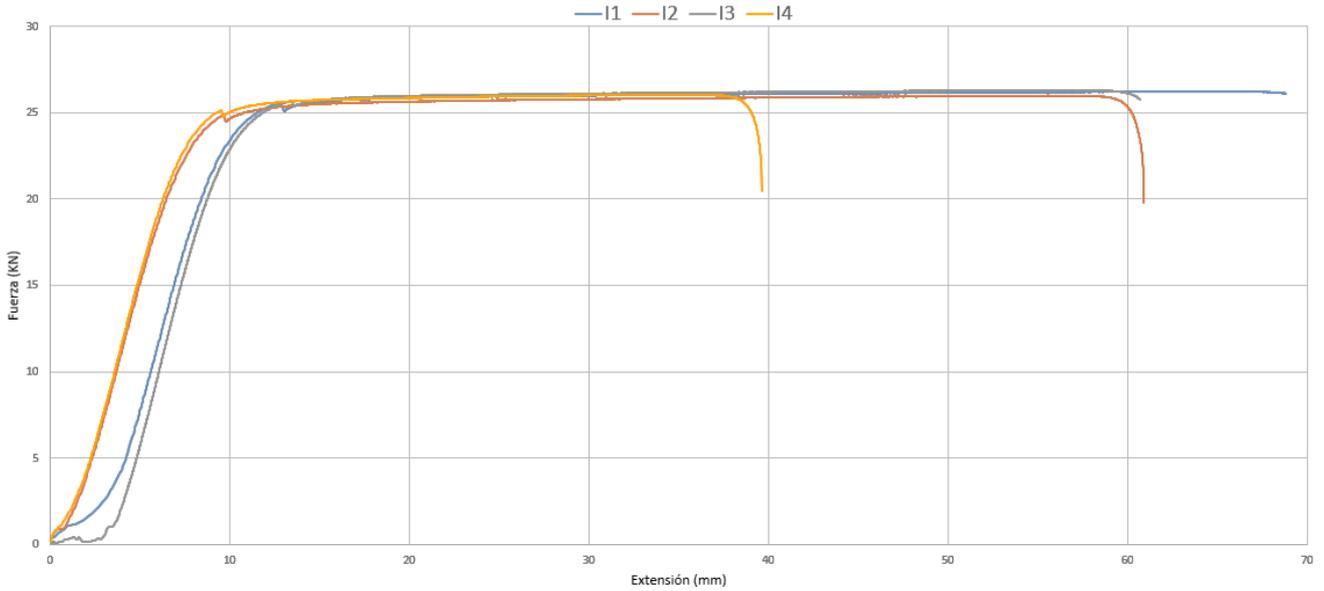


Figura 3.13. Diagrama Fuerza-extensión del ensayo a tracción de las barras corrugadas de acero inoxidable.

Barra	I1	I2	I3	I4
Velocidad (MPa/s)	24,78	24,78	6,00	21,22
Distancia libre (mm)	505,00	480,00	487,00	487,00
Fr (Kn)	20,03	20,07	19,97	20,74
Fm (Kn)	26,24	26,00	26,32	26,05
Rr (MPa)	732,09	736,24	729,36	757,21
Rm (MPa)	958,01	953,77	961,28	951,07
Rp <sub>0,2%</sub> (MPa)	941,94	915,26	950,32	920,04
Ag (%)	10	6,66	8,33	6,66
Agt (%)	10,45	7,11	8,78	7,11
A (%)	30	26,66	25	26,66

Tabla 3.12. Resultados del ensayo a tracción a barras corrugadas de acero inoxidable.

Rm (MPa)	$\delta$	Rm <sub>ck</sub> (MPa)	Rp <sub>0,2%</sub> (MPa)	$\delta$	Agt (%)	$\delta$	A (%)	$\delta$
956,03	3,91	944,30	931,89	14,64	8,36	1,405	27,08	1,816

Tabla 3.13. Resultados medios y característicos del ensayo a tracción de barras corrugadas de acero inoxidable.

### 3.2.2.3 Barras GFRP

En este caso, debido a la falta de recursos e instrumental, no se lleva a cabo la elaboración de los anclajes necesarios para realizar el ensayo de acuerdo con lo estipulado en ACI 440.3C-04.

De todos modos, se lleva a cabo el ensayo sin los anclajes, para poder comprobar el comportamiento sin ellos. Tal y como era de esperar, en la primera prueba (V4) se produce el fallo del ensayo por el deslizamiento de la barra, debido al aplastamiento de la muestra por compresión de la mordaza.

Con el objetivo de evitar que los extremos de las muestras sean aplastados por completo por las mordazas y se produzca una pérdida de sección, lo que conllevaría que la máquina de ensayo mostrara un resultado nulo, se trabajan dichos extremos. Es decir, mediante una maza se golpean los extremos de las barras para que estos se queden con una forma lo más plana posible, facilitando el agarre de las mordazas. A su vez, se limpian y se eliminan los restos de fibra de vidrio que se liberan durante los golpes de la maza, ya que favorecen al deslizamiento de la barra con la mordaza.

El desarrollo de cada una de las pruebas nos aporta diferentes observaciones:

- V4: Se ensaya sin previo trabajo de los extremos, y se produce el fallo por deslizamiento, sin perder sección. Posteriormente se aplastan los extremos y se vuelve a ensayar. Esta vez, aporta valores razonables.
- V3: Tras la preparación de los extremos de la muestra, se obtienen valores similares a los anteriores, y por lo tanto razonables.
- V2: Esta se ensaya con una velocidad más baja para poder observar, si influye en el comportamiento, y al mismo tiempo observarlo mejor. Aplastados los extremos, se desarrolla el ensayo, observando que en los primeros momentos su resistencia aumenta poco a poco debido a falta de agarre, una vez, el agarre es óptimo, la pendiente del diagrama aumenta considerablemente. Aportando valores similares a los anteriores.
- V1: Al igual que en el resto de los casos, se trabajan los extremos y se ejecuta el ensayo, aportando valores dentro de lo normal.



Figura 3.14. Extremo trabajado de una barra GFRP.



Figura 3.15. Ensayo a tracción barra corrugada GFRP.



Figura 3.16. Rotura inferior de una barra GFRP.



Figura 3.17. Rotura superior de una barra GFRP.

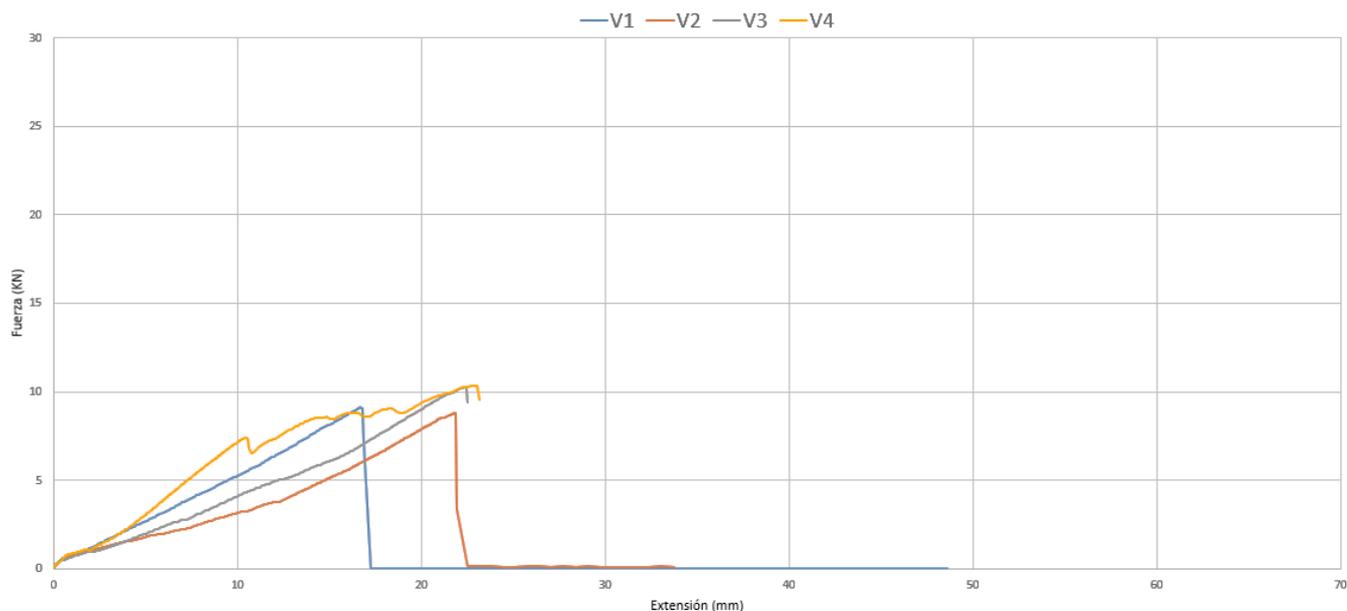


Figura 3.18. Diagrama Fuerza-extensión del ensayo a tracción de las barras corrugadas GFRP.

Barra	V1	V2	V3	V4
Velocidad (MPa/s)	6,00	2,83	6,00	6,00
Distancia libre (mm)	469,00	483,0	489,00	490,00
Fm (Kn)	9,13	8,82	10,27	10,36
Rm (MPa)	336,27	333,83	396,83	395,57
Rp <sub>0,2%</sub> (MPa)	-	-	-	-
A (%)	0	0	0	0

Tabla 3.14. Resultados del ensayo a tracción a barras corrugadas GFRP.

Puesto que los ensayos no se han realizado bajo las condiciones que aconseja la ACI 440.3R-04, para llevar a cabo el análisis y la comparación de resultados de una forma precisa, se obtendrán los valores de las propiedades mecánicas, de ensayos externos realizados atendiendo a todas las consideraciones precisas. Estos han sido realizados por la empresa Aslan FRP, empresa que forma parte de Owens Corning Infrastructure Solutions LLC. y que comercializa este producto bajo el nombre de Aslan 100 Glass Fiber Reinforced Polymer Rebar.

Área sec. Transversal (mm <sup>2</sup> )	Fm (Kn)	Rm <sub>ck</sub> (MPa)	Rp <sub>0,2%</sub> (MPa)	A (%)
31.67	28,34	896	-	1,94

Tabla 3.15. Resultados medios y característicos del ensayo a tracción de barras GFRP.

### 3.2.2.4 Barras BFRP

Al igual que en el caso de las barras GFRP, por falta de recursos, no se han podido obtener los anclajes requeridos en la ACI 440.3R-04. La solución empleada para poder realizar las pruebas sin que se produjera la rotura por compresión en los extremos de las barras y su posterior deslizamiento es similar a la de los ensayos de barras GFRP, aunque en este caso, además de aplastar los extremos se elimina parte de las corrugas, ya que se sueltan de la barra simplemente estirando. Para poder trabajar los extremos de estas barras, además del uso de una maza, se usa un aprieto con el fin de buscar un agarre óptimo.

En este caso, no existen observaciones variantes en los diferentes ensayos de las muestras. Todas se ensayan, posteriormente a ser trabajados sus extremos, a la misma velocidad y en el orden descendente de su numeración: B4, B3, B2, B1.



Figura 3.19. Extremo trabajado de una barra BFRP.

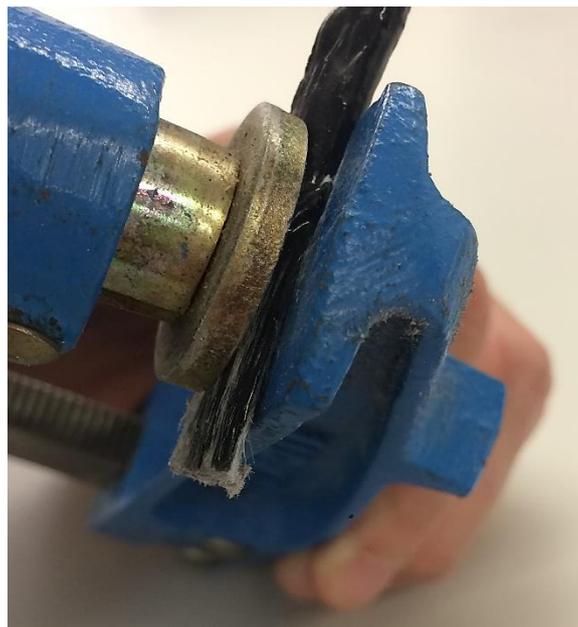


Figura 3.20. Barra BFRP siendo trabajada mediante aprieto.



*Figura 3.21. Ensayo a tracción barra corrugada BFRP.*



*Figura 3.22. Rotura del extremo de una barra BFRP*



*Figura 3.23. Rotura con pérdida de sección de una barra BFRP*

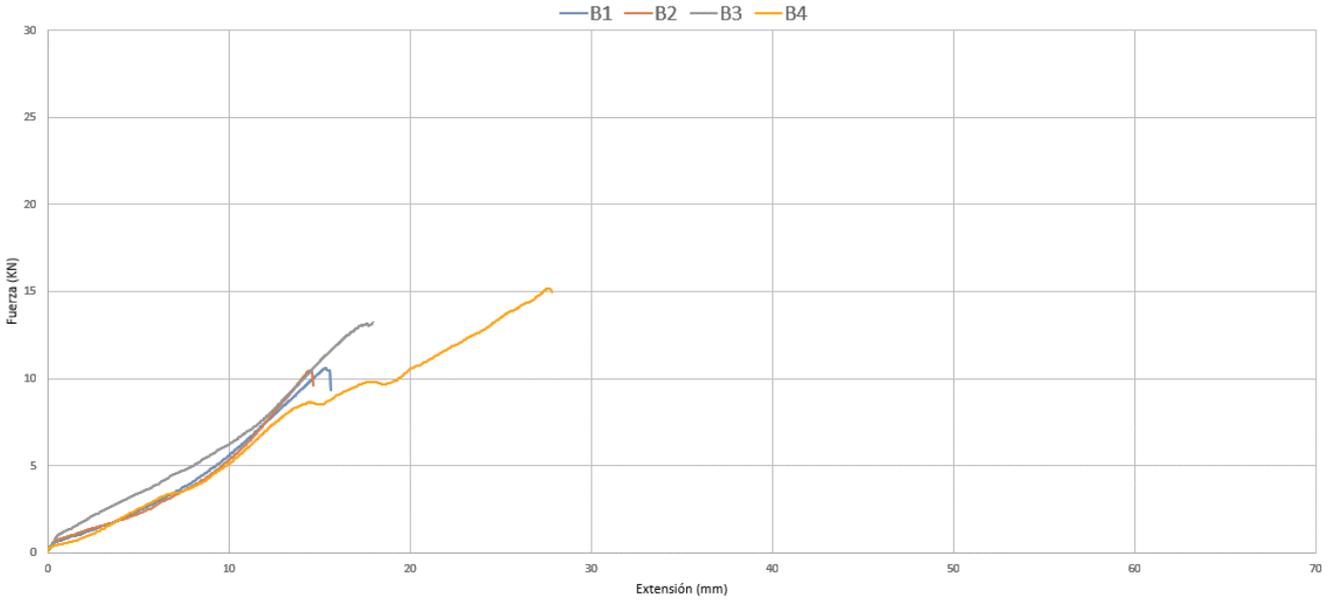


Figura 3.24. Diagrama Fuerza-extensión del ensayo a tracción de las barras corrugadas BFRP

Barra	B1	B2	B3	B4
Velocidad (MPa/s)	6,00	6,00	6,00	6,00
Distancia libre (mm)	389,00	398,00	411,00	421,00
Fm (Kn)	10,60	10,47	13,22	15,10
Rm (MPa)	266,53	268,25	329,26	418,28
Rp <sub>0,2%</sub> (MPa)	-	-	-	-
A (%)	0	0	0	0

Tabla 3.16. Resultados del ensayo a tracción a barras corrugadas BFRP.

Puesto que los ensayos, no se han realizado bajo las condiciones que aconseja la ACI 440.3R-04, para llevar a cabo el análisis y la comparación de resultados se obtendrán dichos valores de ensayos externos a este estudio. Estos ensayos han sido realizados por la empresa que comercializa dicho producto, Basaltec S.L.

El ensayo realizado fue ejecutado por la “Riga Technical University”, concretamente el Instituto de Materiales y Estructuras y certificado por “Inspecta Latvia”, empresa internacional dedicada a la elaboración de inspecciones, certificaciones y pruebas técnicas en el norte de Europa.

Área sec. Transversal (mm <sup>2</sup> )	Fm (Kn)	Rm <sub>ck</sub> (MPa)	Rp <sub>0,2%</sub> (MPa)	A (%)
41,176	40,49	907,7	-	2,148

Tabla 3.17. Resultados medios y característicos del ensayo a tracción de barras BFRP.



## 4. ESTUDIO DE LA SOSTENIBILIDAD

---



#### 4. Estudio cualitativo de la sostenibilidad

Del mismo modo que las barras de estudio poseen propiedades mecánicas que las hacen aptas para ser utilizadas como elementos de construcción, en concreto, como refuerzos de hormigón en las estructuras, en este estudio se analiza además su competencia para adecuarse a una arquitectura sostenible.

Se debe partir de la idea de sostenibilidad entendida como el proceso mediante el cual se llega a un continuo desarrollo sostenible, concepto presentado por primera vez en el Informe Brundtland. Este desarrollo se sustenta sobre las ya mencionadas tres dimensiones: sociocultural, económica y ecológica (*Figura 1.1*).

Para llegar a este objetivo, una buena vía es la arquitectura sostenible, cuyos principios son (Vercher Sanchis, J. M. 2017):

- Planeamiento urbanístico sostenible.
- Consideración del entorno.
- Eficacia y sostenibilidad de los materiales.
- Reducción del consumo de energía.
- Cumplimiento de los requisitos de seguridad, durabilidad y funcionalidad.

Por tanto, entre otras cosas, el uso de materiales sostenibles en la construcción nos acercará a ese objetivo final. Estos materiales se caracterizan por una serie de aspectos fundamentales relacionados con las tres dimensiones del desarrollo sostenible (Vercher Sanchis, J. M. 2017):

- Tienen un origen local
- Duraderos y de escaso mantenimiento
- Económicos
- Derivados de fuentes naturales y renovables
- Bajo contenido energético
- Baja emisión de gases invernadero
- Reciclados y reciclables

A su vez, existen diferentes herramientas que evalúan el carácter sostenible de materiales y productos de la construcción, como es la evaluación de la intensidad energética, las ecoetiquetas o el análisis del ciclo de vida.

##### 4.1 Análisis del ciclo de vida

El ACV, es un sistema de análisis que permite evaluar el impacto ambiental de cualquier producto, de forma sistemática y científica. Este agrupa todos los efectos tanto positivos como negativos sobre el medio ambiente, por parte de un producto. Estos efectos se contabilizan a lo largo de toda la vida útil del producto, siendo esto necesario para obtener un análisis óptimo, ya que, si solo se observara una parte de su ciclo de vida se estarían despreciando muchos impactos, lo que llevaría a un análisis incompleto (Haya, E. 2016).

Una de las principales aplicaciones que tiene el análisis del ciclo de vida, es la de servir a la industria y a la administración, ya que aporta información que, si se combina con otro tipo de datos como económicos y sociales, puede ser decisiva en la toma de decisiones estratégicas importantes (Haya, E. 2016).

Este análisis contempla diferentes etapas del producto, las cuales se encuentran relacionadas entre sí, por lo que se debe tener en cuenta que una reducción de la inversión en una puede suponer un aumento de otra.

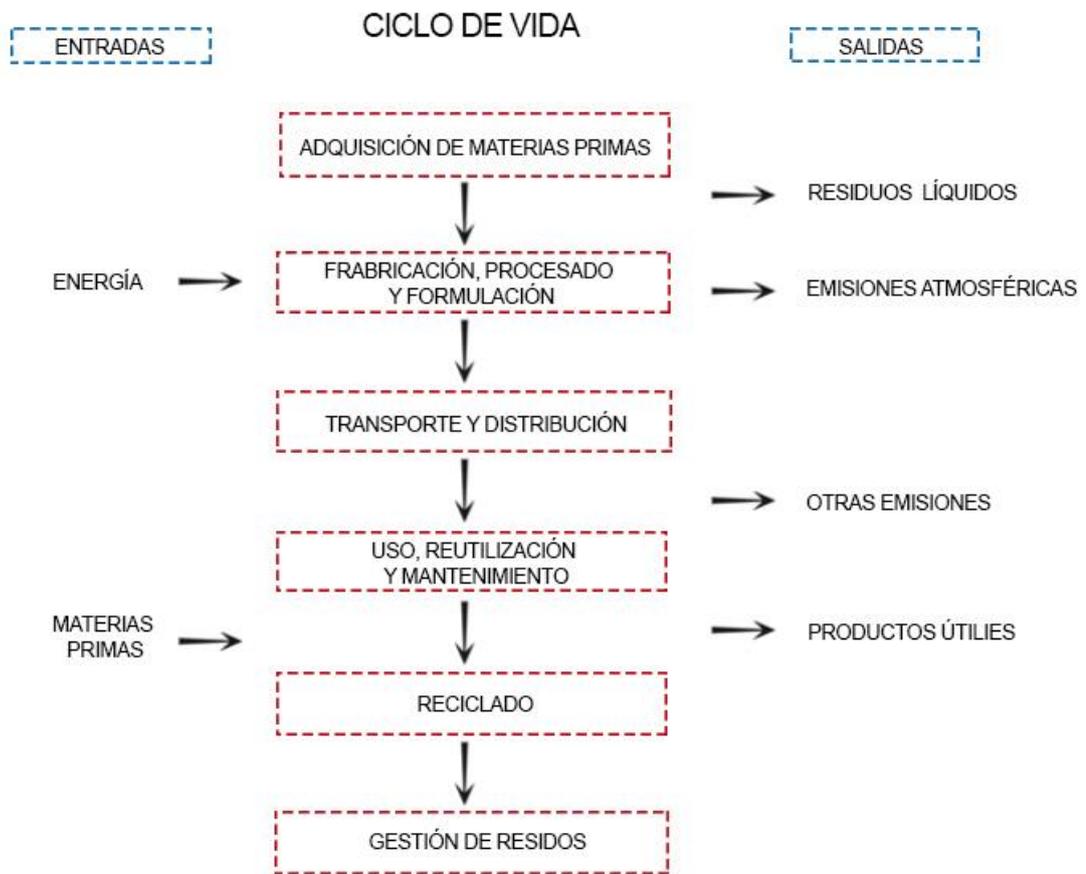


Figura 4.1. Esquema de las etapas del ciclo de vida.

El crecimiento de la preocupación por estos impactos conlleva el aumento de trabajos como de instituciones dedicados al ACV, generando numerosas publicaciones, permitiendo unificar criterios de sostenibilidad, contando como principales organismos activos con la UNEP y el SETAC.

La metodología del ACV, se rige actualmente por lo establecido en diferentes normas, como son la UNE-EN ISO 14040:2006 y la UNE-EN ISO 14044:2006, en ellas se desarrollan las diferentes etapas del ACV, estas se encuentran interrelacionadas entre sí.

- Definición del ámbito de aplicación y objetivos.
- Análisis de inventario. Basado en la cuantificación de flujos de entradas y salidas del sistema del producto.
- Evaluación de impactos potenciales asociados a las entradas y salidas clasificadas en el inventario.
- Interpretación en relación con los objetivos, evaluando conjuntamente los resultados de las fases anteriores.

## 4.2 Estudio de las características sostenibles

Para llevar a cabo un estudio de la sostenibilidad de los productos de estudio, será preciso que se analice todo el ciclo de vida de cada uno de ellos, como bien se ha explicado en el apartado anterior. El largo y complejo proceso de análisis que conlleva el ACV, hace un tanto difícil aplicar su metodología a los diferentes elementos de estudio. A su vez, cada vez se recuerda que este análisis es preciso realizarlo en todas las etapas, existiendo en este caso limitaciones, ya que algunos materiales no se han desarrollado lo suficiente como para poder analizarlos por completo.

Por tanto, sabiendo que si no se observa una de las etapas establecidas podríamos obtener resultados erróneos, se opta por estudiar la sostenibilidad desde otro punto de vista, analizando los diferentes materiales de estudio en función de las principales características fundamentales de los materiales sostenibles.

### 4.2.1 Acero

<i>Origen local</i>	La industria siderúrgica es uno de los principales suministradores de la construcción, siendo una de las más desarrolladas a escala mundial, cuya actividad se encuentra muy repartida.
<i>Reciclados y reciclables</i>	Poseen una gran capacidad para ser reciclados manteniendo la misma calidad de producto, por el contrario, el proceso para reciclar las barras conlleva ciertas dificultades.
<i>Fuentes naturales y renovables</i>	Sin tener en cuenta la capacidad para ser reciclado y el uso de chatarra como materia prima, se puede considerar el mineral de hierro como materia prima principal, fuente natural pero no renovable.
<i>Durabilidad y mantenimiento</i>	El principal problema que pone en riesgo la durabilidad de las barras es la oxidación que tiende a disminuir sus capacidades mecánicas, lo que conlleva un aumento del mantenimiento y sustitución.
<i>Económico</i>	El coste no es elevado debido al desarrollo tecnológico de su producción, pero se ve alterado por su posible coste de mantenimiento y reparación, suponiendo un aumento considerable del coste final.
<i>Contenido energético</i>	Su proceso de fabricación requiere de altas temperaturas, y junto con su transporte, generan un gran consumo energético. Reducido por el uso de chatarra como materia prima.
<i>Emisión de gases</i>	Los procesos de extracción de materias primas, los procesos de fabricación y su posterior transporte suponen grandes emisiones de CO <sub>2</sub> .

Tabla 4.1. Cuadro de las características sostenibles del acero.

El acero se caracteriza por poseer diferentes propiedades propias de los materiales sostenibles, tal y como se refleja en la *Tabla 4.1.*, debido sobre todo a su alta reciclabilidad y re-uso. Pero también se debe tener en cuenta que en su uso y fabricación aparecen factores contradictorios con los principios de la sostenibilidad, generando un alto consumo energético y emisión de sustancias nocivas.

Su gran aptitud para ser reciclable se debe a su alta intensidad energética, pudiendo reciclarse de forma infinita, sin perder calidad. Esto hace que, para producir nuevo acero se pueda utilizar entorno a un 90% de chatarra reciclada como materia prima, lo que permite que se ahorre por cada tonelada de acero reciclado, 1,25 toneladas de mineral de hierro, 630 kg de carbón y 54 kg de caliza (A.A. V.V. 2003). Por tanto, los procesos de extracción, transporte y preparación de estos minerales no se ejecutan, propiciando una disminución en el coste económico y en el consumo de energía y de emisiones.

Además, con la intención de reducir al mínimo los residuos generados en el proceso de producción, la escoria generada también se reutiliza, usándose como sustituto de cemento o áridos en diferentes construcciones, reduciendo la emisión de dióxido de carbono originado por la calcinación del mineral calcáreo (Ortiz, O.; Pasqualino, J.; Castells, F. 2010).

Así mismo, cabe destacar que la industria del acero se encuentra en constante desarrollo estableciendo diferentes mejoras y limitaciones. Una de ellas se aprecia en el proceso de producción, tendiendo a una reducción de consumo de energía, ya que su actual proceso mediante horno de arco eléctrico consume una cantidad bastante menor que el antiguo método de producción mediante alto horno (Montilla, P. J.; Solsona, H.A. (2014).

Las propiedades metálicas del acero tienen un papel muy importante dentro del proceso de reciclaje, ya que permiten mediante diferentes técnicas, que la separación del acero en plantas de construcción o demolición sea exitosa, pudiendo así utilizar este material como materia prima.

Uno de los grandes inconvenientes que presentan las barras corrugadas, además de la emisión de gases y su consumo energético, es la oxidación, ya que puede reducir algunas de las prestaciones sostenibles que presenta el acero, como la durabilidad o el reciclaje, así como prestaciones mecánicas.

Establecidos los aspectos que hacen que el acero sea un material con un alto grado de reciclabilidad, pudiendo llegar a reciclarse el 100%, el porcentaje real del acero reciclado ronda el 45%, debido a la oxidación del material que produce su degradación, haciendo que se reduzca la cantidad de material útil para ser reciclado (Medina Romera, L. 2005-2006). Asumida la capacidad del acero para mantener estables sus propiedades mecánicas a lo largo de toda su vida útil, estas se ven atacadas por la oxidación, pudiendo reducir las en gran medida, ya que se produce una pérdida de sección de la barra, con su consiguiente pérdida de adherencia con el hormigón.

Por tanto, la oxidación hace necesario un exhaustivo proceso de mantenimiento, ya que las consecuencias que se pueden originar pueden ser de gran magnitud. Este mantenimiento, supone por tanto un aumento del coste económico de todo el proceso vital de producto.

Al mismo tiempo, en el caso estricto de las barras de acero como refuerzo del hormigón, el reciclaje de estas estará muy condicionado tanto por el grado de oxidación como por la precisión de la demolición.

### 4.2.2 Acero inoxidable

<i>Origen local</i>	Al igual que el acero tradicional, pertenece a la industria siderúrgica, estando está muy bien distribuida en todos los continentes.
<i>Reciclados y reciclables</i>	Gran capacidad de reciclaje ya que la chatarra se establece como principal materia prima, pero su reciclabilidad depende de diferentes factores.
<i>Fuentes naturales y renovables</i>	Dejando a un lado la chatarra utilizada, las materias primas principales son el hierro y el cromo, este último se obtiene de la cromita que al igual que el hierro, es un mineral de origen natural, pero no renovable.
<i>Durabilidad y mantenimiento</i>	Su gran resistencia a la corrosión, lo dota de un alto grado de durabilidad, con procesos de mantenimiento y reparación mínimos.
<i>Económico</i>	El proceso de producción tiende a suponer un gran coste económico, que será equilibrado por los costes mínimos de mantenimiento y reparación, generalmente.
<i>Contenido energético</i>	Las diferentes etapas del proceso de producción, tales como fundición del hierro u obtención de algunas materias primas, suponen un alto consumo energético.
<i>Emisión de gases</i>	Los procesos de extracción de materias primas, los procesos de fabricación y su posterior transporte suponen una gran emisión de CO <sub>2</sub> .

Tabla 4.2. Cuadro de las características sostenibles del acero inoxidable.

Puesto que la base del acero inoxidable es la misma que la del acero al carbono, cuenta con características semejantes, como su capacidad para ser reciclado y reutilizado, pero al mismo tiempo, cuenta con desventajas similares, como el gran consumo energético y emisión de sustancias nocivas que conllevan su producción y transporte.

La capacidad que distingue al acero inoxidable del acero tradicional se debe a su contenido en cromo, dotándole este de un carácter pasivo frente a los procesos de oxidación. Este hecho permite que sea un material que cuenta con las prestaciones mecánicas propias de un elemento de acero, y a su vez, con propiedades que le doten de una alta durabilidad.

La composición del acero inoxidable permite que este pueda ser reciclado, ya que este puede volver a utilizarse como materia prima manteniendo sus propiedades, al igual que el acero tradicional. Ahora bien, este material al contar con la capacidad de no desarrollar el proceso de oxidación permite que casi el 100% del material pueda ser utilizado como materia prima de nuevo sin perder su calidad. Por otro lado, aunque las barras no sufran oxidación, el reciclaje de estas

sigue marcado por limitaciones similares a las barras de acero, ya que será preciso una demolición minuciosa con el fin de obtener el mayor porcentaje apto de ellas para ser recicladas.

Por último, un aspecto que se debe tener en cuenta de las barras de acero inoxidable es su coste económico, relacionado directamente con sus capacidades de durabilidad. El coste económico vinculado con el uso de este material tiende a ser elevado durante el proceso de fabricación debido al precio de los materiales aleantes, pero si atendemos al coste final, el sobrecoste en la producción permite una reducción en otras etapas, ya que los costes de mantenimiento, inspección o reparación se consideran nulos.

#### 4.2.3 FRP

<i>Origen local</i>	Los materiales compuestos se encuentran en desarrollo, siendo poco conocidos en muchos lugares del planeta, lo que hace que su origen sea difícilmente local.
<i>Reciclados y reciclables</i>	Las técnicas de reciclaje de estos materiales compuestos no producen resultados aceptables, por lo que se encuentran todavía en desarrollo.
<i>Fuentes naturales y renovables</i>	Los polímeros provienen de fuentes naturales no renovables, mientras que las fibras, tanto de vidrio como de basalto provienen en esencia de rocas volcánicas, una fuente natural renovable.
<i>Durabilidad y mantenimiento</i>	Resistentes a la corrosión, presentando una durabilidad óptima.
<i>Económico</i>	Al ser materiales jóvenes, presentan poco desarrollo tecnológico por el momento, lo que conlleva a un aumento del precio en determinados procesos.
<i>Contenido energético</i>	Los procesos de elaboración tanto de las resinas como polímeros, como de las fibras de refuerzo, provocan un alto consumo de energía.
<i>Emisión de gases</i>	Las diferentes etapas de producción de estos materiales compuestos provocan una cierta emisión de gases a la atmósfera, sobre todo de CO <sub>2</sub> .

Tabla 4.3. Cuadro de las características sostenibles de los FRP.

El desarrollo de materiales compuestos o composites en el ámbito de la construcción debido a sus diferentes prestaciones trae consigo la aparición de incógnitas acerca de su compromiso con el medioambiente.

Este hecho se acentúa si se observan los materiales necesarios para la fabricación de sus componentes: polímeros y fibras. Los polímeros se obtienen principalmente de petróleo crudo, gas natural, cloro y nitrógeno. Por otro lado, atendiendo a los refuerzos de fibras, tanto el vidrio como el basalto necesitan de temperaturas muy elevadas durante la fase de producción, y en ocasiones para llegar a estas, es necesario el uso de subproductos del petróleo (Lee, L.; Jain, R. 2009).

Estos materiales necesarios para producir los compuestos de las barras FRP, así como las altas temperaturas necesarias para ello, suponen una gran emisión de contaminación al aire y un alto consumo energético, además del agotamiento de combustibles fósiles.

El reciclaje de estos materiales compuestos como componentes estructurales, es un proceso difícil y limitado, agudizado además en el caso de las barras por el poco desarrollado que poseen. A su vez, los procesos de reciclaje de los productos compuestos conllevan diferentes problemas como que algunas resinas no puedan ser reprocesadas debido a sus enlaces cruzados (Asmatulu, E.; Twomey, J.; Overcash, M. 2014), o que dichos procesos produzcan una elevada contaminación de residuos debido a los desechos líquidos que se generan.

Ahora bien, la principal característica que los acerca a aspectos sostenibles es la durabilidad que presentan, potenciada en el caso de las barras corrugadas FRP. Como es sabido, la oxidación de los elementos estructurales supone un gran problema para el sector de la construcción, provocando una reducción de la vida útil de los edificios, unos elevados costes referidos al mantenimiento y un aumento de la producción de residuos. Este factor permite que su uso determine un mayor tiempo de vida para las estructuras y una reducción en los costes económicos de todos los procesos.

El factor económico también se ve afectado por el joven desarrollo de estos materiales como barras de refuerzo, ya que los procesos de fabricación generan grandes costes, pero que del mismo modo que el acero inoxidable, este coste se verá reducido por su bajo mantenimiento.

Por último, profundizando un poco más en los materiales FRP, se pueden observar pequeñas discrepancias en cuando a sus capacidades para adaptarse a estas características propias de los materiales sostenibles. Desde un punto de vista general su carácter sostenible es similar debido a su misma estructura y composición, en cambio, existen pequeñas diferencias que se deben al material de las fibras de refuerzo. El basalto a priori presenta menores costes en la producción de la materia prima, así como propiedades biodegradables. Además, la pasividad frente al proceso de oxidación está asegurada, pero en algunos casos la fibra de vidrio deberá ser tratada si va a estar en contacto con un pH elevado, a diferencia del basalto (Subramanian, N. 2010).



## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

---



## 5. Discusión de resultados

### 5.1 Estudio del comportamiento mecánico

Una vez ejecutados los diferentes ensayos y tras obtener los resultados que permiten un acercamiento al conocimiento tanto de las características propias como al comportamiento mecánico de los diferentes materiales como refuerzo del hormigón, se pretende realizar un análisis, presentando diferentes observaciones destacables de los ensayos realizados, con la intención de describir las variables que presentan unos respecto a otros.

Las muestras que han servido de objeto de estudio han sido sometidas en un primer instante a pruebas geométricas y ponderales, con el fin de conocer diferentes características que apoyen su grado de aptitud para considerarse como refuerzo estructural. Midiendo su peso, área de sección y dimensiones de las corrugas se consideran diferentes factores que influyen tanto en el diseño estructural como en el comportamiento mecánico.

	<i>Acero</i>	<i>Acero inoxidable</i>	<i>GFRP</i>	<i>BFRP</i>
<i>Peso (kg/m)</i>	0,2177	0,2147	0,0595	0,0825
<i>Área sec. Transversal (mm)</i>	27,63	27,355	26,41	38,75
<i>Altura máx. Corrugas</i>	0,366	0,535	0,2315	0,578
<i>Separación corrugas (mm)</i>	4,375	5,125	17,45	15,80

*Tabla 5.1. Cuadro resumen ensayo geométrico y ponderal.*

Analizando los resultados de estos ensayos, el peso de las muestras es el factor que presenta mayor dispersión entre los diferentes materiales. El bajo peso de los elementos FRP, representa un 30% aproximadamente de los valores que poseen el acero o el acero inoxidable, lo cual lleva a considerar que el uso de estos materiales supone una disminución en la dificultad de montaje de los diferentes elementos estructurales, facilitando tanto el trabajo manual como tecnológico, repercutiendo además en aspectos vinculados a una práctica más sostenible.

Asimismo, uno de los fenómenos más importantes y necesarios para que el hormigón armado pueda mantener su capacidad estructural es la adherencia entre el hormigón y el refuerzo. Esta adherencia se puede conseguir mediante procesos químicos o físicos. Aunque este aspecto no ha sido objeto de estudio en este trabajo, cabe destacar que si atendiésemos a las muestras de ensayo, se podría asegurar que la adherencia física como tal, no se produciría de forma óptima en el caso de los materiales FRP, ya que esta se debe a las corrugas de los refuerzos, y mientras que en las barras de acero y acero inoxidable las corrugas se realizan en el proceso de laminación de forma precisa, en el caso de las muestras FRP obtenidas, las corrugas presentan únicamente una forma de hélice entorno a la barra, que mediante un simple golpe se despega de la misma, produciendo que la adherencia física pueda no ser del todo óptima. Esto además se acentúa si se observa la separación entre corrugas que presentan cada uno de los tipos de barras, tendiendo en el caso de las FRP, a considerar el corrugado como un elemento sin eficacia, donde la adherencia física se podría considerar como “microfísica”, fruto de la superficie rugosa que presenta la barra, pero en ningún momento por acción de las corrugas como ocurre con barras de otros materiales.

Por otro lado, atendiendo a ensayos externos realizados en la propia Universidad Politécnica de Valencia, basados en el método pull-out, tal y como sugiere la norma ACI 440. 1R-06, se mide la capacidad adherente de barras corrugadas FRP con el hormigón y el deslizamiento de estas, concluyendo que las barras corrugadas FRP, tienen un comportamiento adherente muy similar al de las barras corrugadas de acero. Inicialmente desarrollan una adherencia química que, al aumentar la tensión de ensayo, se convierte en una adherencia física, mediante un mecanismo de acuñamiento mecánico junto con el rozamiento de las corrugas, al igual que las barras corrugadas de acero (Calvet Rodríguez, V. 2014). Ahora bien, estos estudios determinan que el modo de rotura de estas barras dependerá de la resistencia a corte de la resina de las corrugas y de la resistencia del hormigón.

Observando ahora los resultados obtenidos de los ensayos a tracción ejecutados, se puede hacer un análisis de las diferencias que presentan en su comportamiento los cuatro tipos de barras corrugadas cuando se someten a un esfuerzo de tracción.

Partiendo del comportamiento que adquieren las barras de acero y acero inoxidable, se observa un diagrama fuerza-extensión tipo de materiales elásticos, siguiendo un recorrido elástico-plástico con escalón de cedencia, llegando a obtenerse en los ensayos resistencias mecánicas con valores cercanos a los comúnmente conocidos y alargamientos de rotura admisibles. Aun así, cabe destacar las resistencias mecánicas características que se alcanzan en los ensayos de barras de acero inoxidable, obteniéndose 944,30 MPa, valor muy superior a los 649,68 MPa que presenta el acero tradicional al carbono, esto se debe a que durante el proceso de fabricación sufre una laminación en frío, donde se consiguen resistencias muy elevadas, en cambio la resistencia de las barras corrugadas de acero inoxidable laminadas en caliente se encuentra entorno a los 600 MPa, valor similar a los obtenidos en los ensayos de los corrugados de acero.

Por otro lado, en los ensayos de las barras FRP, tanto las reforzadas con fibra de vidrio como con fibra de basalto, no todas llegan a la rotura debido al deslizamiento que sufren en las mordazas, pero si se aprecia del mismo modo que en los ensayos realizados por las diferentes empresas citadas en el *apartado 4.2.3 y 4.2.4*, un comportamiento propio de los materiales compuestos, generando un diagrama fuerza-extensión elástico-lineal, donde se observa una fase elástica, pero a diferencia de los anteriores no hay presencia de fase plástica, determinando un comportamiento frágil de los materiales, llegando a la rotura sufriendo deformaciones muy pequeñas en comparación con el resto.

Lo destacable de estos materiales son las altas resistencias mecánicas que arrojan los ensayos externos de estas barras FRP, llegando a valores entorno a los 900 MPa, y aunque los ensayos propios no se puedan considerar válidos los resultados obtenidos presentan resistencias altas para la poca deformación sufrida. Estas resistencias se deben sobre todo a su estructura de fibras, permitiendo absorber grandes esfuerzos a tracción en la dirección paralela a la disposición de estas. Estas resistencias serán variantes en función del diámetro, observándose en ensayos externos (Calvet Rodríguez, V. 2014) (Almerich Julia, A. 2010), que el aumento del diámetro de la barra de refuerzo no supone un aumento de la resistencia, sino que trae consigo una disminución de las cargas que son capaces de absorber dichas barras.

Por otro lado, por el hecho de que las barras corrugadas FRP sufriesen una rotura a compresión por la acción de las mordazas, puede parecer que su resistencia a compresión se vea afectada

dentro del hormigón, pero esto en realidad no determina su capacidad resistente frente a estos esfuerzos, ya que en el interior del hormigón la compresión será uniforme y repartida a lo largo de la barra, por lo que no se verá sometida a fuerzas tan elevadas.

Por tanto, si se analiza el comportamiento general y se atienden a las observaciones descritas anteriormente, uno de los aspectos más destacables, son las altas resistencias a tracción que presenta el acero inoxidable, gracias a su proceso de laminación en frío. Además, como era de esperar, otro factor interesante, son las altas resistencias a tracción que presentan los materiales FRP que, junto a su bajo peso, presentan la propuesta más óptima en cuanto a la relación peso-resistencia se refiere, obteniéndose relaciones muy similares tanto en las barras corrugadas de fibra de vidrio como en las de fibra de basalto.

## 5.2 Estudio cualitativo de la sostenibilidad

Analizado el comportamiento mecánico de las diferentes barras objeto de estudio, será preciso conocer si este se encuentra respaldado por un carácter sostenible y para ello se ha investigado la capacidad que posee cada uno de los materiales que constituyen las barras, para adecuarse y adaptarse a las características propias de los materiales sostenibles.

Las consideraciones desarrolladas en el *apartado 4.2*, corroboran la dificultad de que un material presente un comportamiento completamente sostenible, siendo muy importante la relación entre cada uno de los factores sostenibles.

Tanto el acero tradicional como el acero inoxidable presentan a gran escala aspectos favorables para ser reciclados, gracias a su capacidad de poder mantener sus propiedades, pero los procesos que lo hacen posible conllevan un alto consumo energético, que por contra son menores que los producidos si no se llevara a cabo el reciclaje. Por otro lado, los materiales FRP no poseen técnicas desarrolladas que permitan su óptimo reciclaje, a lo que se le añade el gran consumo energético necesario para producir las materias primas, pero que puede verse compensado por la gran durabilidad que presentan estas como refuerzo del hormigón.

La capacidad para ser reciclados supone uno de los aspectos que más influencia tiene sobre el carácter sostenible de un material, ya que se encuentra estrechamente ligada a otros como el consumo energético, las emisiones contaminantes e incluso al coste económico. Como ya se ha descrito en apartados anteriores, las barras corrugadas de acero presentan una gran aptitud para ser recicladas pero el proceso de oxidación interfiere en ello, ya que reduce notablemente las propiedades mecánicas de estas, en cambio el acero inoxidable, al no sufrir oxidación es capaz de mantener sus propiedades intactas. Esto conlleva que el resto de los factores se vean comprometidos, ya que la oxidación de las barras supone una disminución de chatarra óptima para ser reciclada y por consecuencia un aumento tanto del coste energético como del coste de mantenimiento.

Ahora bien, si analizamos la capacidad que poseen los corrugados FRP para ser reciclados, es evidente que se trata de un proceso complicado debido a su composición. La dificultad que presentan los procesos de separación de las resinas de las fibras de refuerzo, junto con el poco desarrollo que poseen estos materiales en este campo, suponen procesos con un alto consumo energético y emisión de gases. Además, cabe mencionar que algunos polímeros no cuentan con propiedades que permitan su reciclaje puesto que su composición no permite que sean reprocesados.

Sin embargo, el potencial sostenible que presentan estos materiales abre numerosas vías de investigación y desarrollo, y es por ello por lo que cada vez el número de investigaciones y estudios entorno a estos aumenta. Un caso de estos se ha desarrollado en la Universidad de Alicante, donde investigadores han desarrollado un método para reciclar embarcaciones y estructuras compuesta de fibra de vidrio y resina. Se trata de un proceso químico que consiste en separar la fibra de vidrio de las resinas, sin dañarlas, para así poder utilizarlas de nuevo manteniendo sus propiedades.

Por otro lado, una de las fases del ciclo de vida que más interfiere en el desarrollo sostenible de estos materiales, es el transporte, constituyendo un alto consumo de recursos no renovables, así como una gran producción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta actividad se ve influenciada por diferentes factores relacionados con los materiales que se transportan, como el origen de estos o su peso.

El poco desarrollo de la industria de los elementos de refuerzo FRP, hace que difícilmente el origen de estos productos tienda a ser local, a lo que se le añade su incapacidad por el momento de ser reciclados de forma óptima, lo que conlleva un aumento del transporte de las materias primas desde su yacimiento, ya que tanto la fibra de vidrio como la de basalto proceden en esencia de minerales.

El peso de las barras de refuerzo, y sobre todo su relación con las resistencias que estas presentan, se encuentra estrechamente vinculada tanto al factor transporte como al factor económico. El poco peso que poseen los corrugados FRP junto con las relaciones peso/resistencia en comparación con las de acero y acero inoxidable, supone que el transporte de estas se reduzca, ya que una igualdad de resistencias supone una diferencia cuantitativa importante en cuanto a peso se refiere, teniendo que transportarse menores cantidades de barras de refuerzo, lo que se traduce en una disminución tanto del coste económico como de la producción de sustancias nocivas para el medio ambiente.

	<i>Acero</i>	<i>Acero Inoxidable</i>	<i>GFRP</i>	<i>BFRP</i>
<i>Peso/Resistencia</i>	$3,28 \cdot 10^{-4}$	$2,24 \cdot 10^{-4}$	$6,64 \cdot 10^{-5}$	$8,39 \cdot 10^{-5}$

Tabla 5.2. Relación peso/resistencia de las barras corrugadas

El factor económico es uno de los tres principios básicos del desarrollo sostenible que, en el caso de las barras corrugadas, se encuentra vinculado a su comportamiento mecánico, suponiendo un factor bastante relevante en su determinación, la relación peso/resistencia. Tal y como se ha concluido en el estudio del comportamiento mecánico, las resistencias de los elementos FRP, se encuentran muy por encima de la de los elementos de acero y acero inoxidable, siempre que no sean tratados mediante procedimientos especiales.

	<i>Acero</i>	<i>Acero inoxidable</i>	<i>GFRP</i>	<i>BFRP</i>
$\varnothing 6 \text{ mm}$	0,24	1,71	0,60	0,42
$\varnothing 8 \text{ mm}$	0,43	3,04	0,90	0,70
$\varnothing 10 \text{ mm}$	0,67	4,34	1,50	0,95
$\varnothing 12 \text{ mm}$	0,97	6,14	2,20	1,27

Tabla 5.3. Precios de venta de barras corrugadas (€/m)

Atendiendo en este caso a los precios de venta de los cuatro tipos de barras corrugadas de estudio, en función de diferentes diámetros, se puede observar que el tratamiento de laminación en frío de las barras de acero inoxidable las hace realmente menos económicas que el resto, pero tal y como se ha citado anteriormente, este aumento del coste en una fase inicial hace que se reduzca al mínimo los futuros costes por mantenimiento.

Ahora bien, si lo comparamos con los precios de los corrugados FRP, se demuestra que estos presentando las mismas resistencias y aptitudes durables, poseen un precio de venta menor, que se ve potenciado por su relación peso/resistencia, que hará que el coste en otras fases de proyecto sea menor. Aun así, cabe destacar que el poco desarrollo tecnológico hasta la fecha de este tipo de materiales en funciones estructurales hace que otros procesos como reciclaje o producción conlleven otro tipo de gastos económicos.

Por tanto, se puede concluir que no existe un material sostenible ideal que cumpla todos los requisitos por encima del resto, sino que deberá ajustarse lo máximo posible a estos, equilibrando el conjunto de todos los factores sostenibles debido a la gran interrelación existente entre ellos.

Los materiales tradicionales, acero y acero inoxidable, presentan altos consumos energéticos y una elevada producción de residuos, debiendo la industria metalúrgica llevar a cabo estrategias que incidan directamente sobre el conjunto de procesos causantes de ello, así como fomentar el desarrollo y la innovación en nuevos procesos de reciclaje que permitan que de forma indirecta estos factores, que los alejan de los principios sostenibles, se minimicen.

En cambio, el punto fuerte de los materiales FRP recae en su potencial desarrollo, siendo hasta la fecha este una pequeña parte de lo que se espera. Sus características propias como altas resistencias, bajo peso y capacidades altas de durabilidad generan una nueva vía hacia estructuras con mayores resistencias mecánicas y ambientales utilizando menos material que en estructuras tradicionales, y además con menores costes económicos. Ahora bien, para ello será preciso que aumenten los estudios e investigaciones fomentando la innovación en todos los procesos vinculados a estos materiales, como producción, reciclaje y seguridad.



## 6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

---



## 6. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

En este apartado, se determinan las conclusiones resultantes del estudio comparativo de barras corrugadas como refuerzo del hormigón, ejecutado mediante ensayos y análisis precisos para conocer el comportamiento mecánico y el carácter sostenible de estas.

Al mismo tiempo, se citan futuras líneas de investigación, ya que el tema tratado todavía posee numerosas vías de desarrollo, pudiendo llevarse a cabo diferentes estudios y trabajos con el objetivo final de ampliar el conocimiento acerca de la variedad de soluciones que pueden servir de refuerzo en el hormigón estructural.

### 6.1. Conclusiones

Atendiendo a los ensayos experimentales realizados y a los análisis comparativos de los resultados arrojados, se puede concluir lo siguiente:

1. El comportamiento mecánico de las barras corrugadas FRP, se describe con un diagrama elástico-lineal sin una fase plástica, demostrando un comportamiento frágil sin deformaciones en la rotura. Pudiendo alcanzar resistencias mecánicas que superan notablemente a las obtenidas en los ensayos de corrugados de acero o acero inoxidable, debido a su estructura fibrosa.
2. Los tratamientos especiales de laminación en frío, permite a los corrugados de acero inoxidable obtener valores considerablemente altos en comparación con los obtenidos en barras sin estos tratamientos. Estos aceros inoxidables tratados en frío, tienen capacidad para competir con los corrugados FRP, en cuanto a resistencias mecánicas se refiere.
3. El comportamiento sostenible de los diferentes tipos de barras corrugadas depende de la interacción de diferentes factores sostenibles vinculados a ellas. El reciclaje, es uno de los factores que más influencia ejerce sobre el resto, tendiendo a determinar el aumento o disminución de consumo energético y producción de sustancias contaminantes.
4. La relación peso – resistencia posee un papel fundamental en la comparación de materiales, ya que determina aspectos ventajosos, tanto mecánicos como sostenibles, de las barras FRP respecto a las de acero y acero inoxidable. Los bajos pesos de los materiales FRP vinculados a sus altas resistencias, ofrecen opciones al desarrollo del diseño y del carácter sostenible de las estructuras.
5. Los elementos de refuerzo FRP se encuentran todavía en una fase prematura de desarrollo, a falta de normativas, guías de diseño e investigaciones y estudios acerca de su comportamiento en diferentes ambientes, con el objetivo de obtener suficientes datos, para establecer una base totalmente fiable para su uso como refuerzo del hormigón.

## 6.2. Futuras líneas de investigación.

El trabajo realizado mantiene todavía el posible desarrollo de diferentes líneas de investigación, con las que se obtendrá un conocimiento más completo acerca del tema tratado, tanto desde el punto de vista mecánico como del punto de vista sostenible.

1. Desarrollar estudios experimentales que permitan obtener un conocimiento más detallado y completo acerca de las propiedades mecánicas de las barras de refuerzo FRP, referidos al comportamiento a compresión, flexión y adherencia.
2. Ampliación de las normativas, códigos de diseño y seguridad de los elementos de refuerzo FRP, mediante ensayos experimentales de barras corrugadas FRP frente a diferentes situaciones ambientales.
3. Revisión de los criterios establecidos por las normativas españolas en cuanto a elementos estructurales se refiere, para adecuarlos con las características de las barras de refuerzo compuestas.
4. Desarrollar estrategias que fomenten el desarrollo e innovaciones en el ámbito de producción, reciclaje y transporte de los diferentes tipos de barras corrugadas, y por consiguiente en el de los materiales que las componen, con la intención de desarrollar procesos más comprometidos con el medio ambiente.
5. Ejecutar un análisis del ciclo de vida de cada uno de los tipos de barras corrugadas tratadas para obtener un resultado preciso del impacto que generan cada una de ellas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

---



## 7. Bibliografía

1. ACI 440. 1R-01 (2001). *"Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars"*. ACI Committee 440, American Concrete Institute, USA.
2. ACI 440. 1R-03 (2003). *"Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars"*. ACI Committee 440, American Concrete Institute, USA.
3. ACI 440. 1R-06 (2006). *"Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars"*. ACI Committee 440, American Concrete Institute, USA.
4. ACI 440. 3R-04 (2004). *"Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers for reinforcing or strengthening Concrete Structures."* ACI Committee 440, American Concrete Institute, USA.
5. Autores Varios (2003). *"Armaduras de Acero Inoxidable" 1ª Edición*. Ed. Bastidas. D.M.; Medina, E. Empresa Cedinox, Madrid, España.
6. Almerich Julia, A. (2010). *"Diseño, según Estados Límites, de estructuras de hormigón armado con redondos de fibra de vidrio GFRP."* Tesis Doctoral. Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Politécnica de Valencia, España.
7. Aranda, A.; Scarpellini, S.; Zabalza, I.; Días de Garayo, S. (2014). Impacto de los materiales de construcción, análisis de ciclo de vida. Revista EcoHabitar.org. Disponible a 08/08/2018 en <http://www.ecohabitar.org/analisis-de-ciclo-de-vida-de-los-materiales-de-construccion/>
8. Asmatulu, E.; Twomey, J.; Overcash, M. (2014) *"Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept."* Journal of composite, 48.
9. Belzunce, F. J. (2001). *"Aceros y Fundiciones: Estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones."* Universidad de Oviedo, España. Disponible a 15/06/2018 en: <https://aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>
10. Calvet Rodríguez, V. (2014). *"Influencia de los distintos tratamientos superficiales de las barras de fibra de carbono en su comportamiento adherente con el hormigón."* Tesis Doctoral. Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Universidad Politécnica de Valencia. España.
11. Durán Avilés, A.M. (2009-2012). *"Efecto de la predeformación en la vida a fatiga de un acero inoxidable austenítico metaestable."* Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
12. Haya, E. (2016). *"Análisis del ciclo de vida (ACV)"* Ed. Fundación EOI Escuela de Organización Industrial, Madrid, España.

13. ISIS (2001). *"Reinforcing concrete structures with fibre reinforced polymers. Design Manual nº 3."* Canadian Network of Centres of Excellence on intelligent Sensing for Innovative Structures, Canada.
14. ISSF (2018). *"Stainless Steel in Figures 2018"* International Stainless Steel Forum. Disponible a 20/08/2018 en: [http://www.worldstainless.org/statistics/publications\\_and\\_papers](http://www.worldstainless.org/statistics/publications_and_papers)
15. JSCE. (1997). *"Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials"*. Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Japan Society of Civil Engineers, Japan.
16. Lee, L.; Jain, R. (2009). *"The role of FRP composites in a sustainable world."* Clean Technologies and Environmental Policy, V.11. pp 247-249. Disponible a 16/08/2018 en <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10098-009-0253-0>
17. Medina Romera, L. (2005-2006). *"Análisis de la viabilidad económica y ambiental del uso de armaduras corrugadas de acero inoxidable en elementos de hormigón armado sometidos a clases de exposición agresivas. Aplicación a elementos en contacto con aguas residuales."* Escola Técnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, España.
18. Montilla, P. J.; Solsona, H.A. (2014). *"La sostenibilidad del acero y las estructuras"*. Universidad de los Andes, Venezuela. Disponible a 22/05/2018 en <http://revistas.saber.ula.ve/index.php/ecodiseno/article/view/7912/7854>
19. Ortiz, O.; Pasqualino, J.; Castells, F. (2010). *"Evaluación ambiental basado en el análisis del ciclo de vida (ACV) en la fase de construcción de una edificación en Cataluña."* Departamento de Ingeniería Química. Universidad Rovira i Virgili, Tarragona, España.
20. Poveda, J. (2012). *"Metodología de diseño de materiales compuestos de matriz poliorgánica reforzados con fibras discontinuas para aplicaciones en transporte."* Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid, España.
21. Revista ARQHYS. (2012). Clasificación del acero. Revista ARQHYS.com. Disponible a 07/04/2018 en: <https://www.arqhys.com/arquitectura/acero-clasificacion.html>
22. Revista ARQHYS. (2012). Historia del acero. Revista ARQHYS.com. Disponible a 07/04/2018 en: <https://www.arqhys.com/arquitectura/acero-historia.html>
23. Revista ARQHYS. (2012). Acero y construcción. Revista ARQHYS.com. Disponible a 07/04/2018 en: <https://www.arqhys.com/arquitectura/acero-construccion.html>
24. Revista ARQHYS. (2012). Estudios del acero en la arquitectura. Revista ARQHYS.com. Disponible a 07/04/2018 en: <https://www.arqhys.com/arquitectura/acero.html>

25. Revista ARQHYS. (2017). Características del acero. Revista ARQHYS.com. Disponible a 07/04/2018 en: <https://www.arqhys.com/construccion/acero-caracteristicas.html>
26. Revista Textos Científicos. (2013). Acero. Revista Textos Científicos.com. Disponible a 07/04/2018 en: <https://www.textoscientificos.com/quimica/acero>
27. Subramanian, N. (2010). "Sustainability of RCC Structures Using Basalt Composite Rebars". The masterbuilder magazine. USA.
28. UNE-EN ISO 10088-1: 2015. *"Aceros inoxidables. Parte 1: Relación de aceros inoxidables."*
29. UNE-EN ISO 15630-1: 2003. *"Aceros para el armado y el pretensado del hormigón. Métodos de ensayo. Parte 1: Barras, alambres y alambión para hormigón armado."*
30. UNE-EN ISO 15630-1: 2011. *"Aceros para el armado y el pretensado del hormigón. Métodos de ensayo. Parte 1: Barras, alambres y alambión para hormigón armado."*
31. UNE-EN ISO 6892-1: 2010. *"Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente."*
32. Vercher Sanchis, J. M. (2017). *"Materiales de Construcción Sostenible"*. Universidad Politécnica de Valencia, España.

## 7.1 Referencias de figuras

- Figura 1.1 Fuente: <http://www.sonria.com/glossary/sustentabilidad/>
- Figura 2.1 Reelaborada. Fuente: [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13\\_2.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_2.html)
- Figura 2.2 Reelaborada. Fuente: <http://technovale.blogspot.com/2013/04/proceso-siderurgico-obtencion-del-acero.html>
- Figura 2.3 Reelaborada. Fuente: <https://www.nzsteel.co.nz/new-zealand-steel/the-story-of-steel/the-steel-making-process/hot-rolling-mill/>
- Figura 2.4 Elaboración propia.
- Figura 2.5 Reelaborada. Fuente: <http://www.nioglas.com/pultrusion-composite.php>
- Figura 3.1 Elaboración propia.
- Figura 3.2 Fuente: <http://go.instron.com/es-ar/home/testing-solutions/by-test-type/tension/basalt-fiber-reinforced-plastic>
- Figura 3.3 Elaboración propia
- Figura 3.4 Fuente: UNE-EN ISO 6892-1
- Figura 3.5 Reelaborada. Fuente: UNE-EN ISO 6892-1
- Figura 3.6 Elaboración propia.
- Figura 3.7 Elaboración propia.
- Figura 3.8 Elaboración propia.
- Figura 3.9 Elaboración propia.
- Figura 3.10 Elaboración propia.
- Figura 3.11 Elaboración propia.
- Figura 3.12 Elaboración propia.
- Figura 3.13 Elaboración propia.
- Figura 3.14 Elaboración propia.
- Figura 3.15 Elaboración propia.
- Figura 3.16 Elaboración propia.
- Figura 3.17 Elaboración propia.
- Figura 3.18 Elaboración propia.
- Figura 3.19 Elaboración propia.
- Figura 3.20 Elaboración propia.
- Figura 3.21 Elaboración propia.
- Figura 3.22 Elaboración propia.
- Figura 3.23 Elaboración propia.
- Figura 3.24 Elaboración propia.
- Figura 4.1 Reelaborada. Fuente: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/25482/analisis-de-ciclo-de-vida>

## 7.2 Referencias de tablas

<b>Tabla 2.1</b>	Reelaborada. Fuente: <a href="http://www.worldstainless.org/statistics/publications_and_papers">http://www.worldstainless.org/statistics/publications_and_papers</a>
<b>Tabla 2.2</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por fabricante Basaltec S.L.
<b>Tabla 2.3</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por fabricante Basaltec S.L.
<b>Tabla 3.1</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por fabricante Blgator S.L.
<b>Tabla 3.2</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por fabricante Roldan S.A.
<b>Tabla 3.3</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por fabricante Roldan S.A.
<b>Tabla 3.4</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por fabricante Fivicor.
<b>Tabla 3.5</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por fabricante Basaltec S.L.
<b>Tabla 3.6</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.7</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.8</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.9</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.10</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.11</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.12</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.13</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.14</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.15</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por empresa Aslan FRP.
<b>Tabla 3.16</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 3.17</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por fabricante Basaltec S.L.
<b>Tabla 4.1</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 4.2</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 4.3</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 5.1</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 5.2</b>	Elaboración propia.
<b>Tabla 5.3</b>	Reelaborada. Fuente: Información facilitada por fabricantes.

