



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



APLICACIÓN DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO EN TORRES EÓLICAS DE GRAN ALTURA

Trabajo realizado por:

Javier Fernández Fernández

Dirigido:

Carlos Thomas García

Laura González Suárez

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, febrero de 2020

TRABAJO FIN DE MASTER

Tabla de contenido

Resumen.....	4
Abstract	5
1. Estado del arte	6
1.1. Torres eólicas.....	6
1.1.1. Introducción	6
1.1.2. Torres eólicas de gran altura	6
1.1.3. Métodos constructivos	7
1.2. Hormigón.....	8
1.2.1. Introducción	8
1.2.2. Estructura y matriz del hormigón.....	8
1.2.3. Árido del hormigón.....	9
1.2.4. Refuerzo para el hormigón.....	10
1.3. Fibras para hormigón.....	11
1.3.1. Introducción	11
1.3.2. Tipología	11
1.4. Hormigones reforzados con fibras.....	13
1.4.1. Dosificación, amasado y puesta en obra	13
1.4.2. Hormigones reforzados con fibras de acero	14
1.4.3. Propiedades físicas	14
1.4.4. Propiedades mecánicas	14
1.4.5. Aplicaciones.....	15
1.5. Anclajes para hormigón.....	16
1.5.1. Introducción	16
1.5.2. Tipología de anclajes	17
1.5.3. Comportamiento de los anclajes.....	21

1.5.4. Comportamiento de los anclajes en hormigón con fibras.....	21
2. Materiales y metodología.....	22
2.1. Determinación de la densidad del cemento	22
2.2. Caracterización de los áridos	23
2.2.1. Granulometría	24
2.2.2. Determinación de la densidad	25
2.2.3. Determinación del coeficiente de absorción	27
2.3. Fibras	27
2.4. Propiedades del hormigón en estado fresco.....	28
2.4.1. Dosificación del hormigón	28
2.4.2. Fabricación y curado de probetas.....	31
2.4.3. Determinación de la consistencia	35
2.5. Propiedades físicas del hormigón endurecido.....	36
2.5.1. Determinación de la densidad	37
2.5.2. Determinación de la porosidad accesible.....	38
2.5.3. Determinación del coeficiente de absorción	39
2.6. Propiedades mecánicas del hormigón endurecido.....	39
2.6.1. Determinación de la resistencia a compresión	39
2.6.2. Determinación de la resistencia a tracción por flexión.....	40
2.7. Determinación de la fuerza de arrancamiento de anclajes.....	43
3. Resultados y análisis.....	45
3.1. Propiedades del cemento	45
3.1.1. Densidad	45
3.2. Propiedades de los áridos	45
3.2.1. Granulometría	45
3.2.2. Densidad	46
3.2.3. Absorción.....	46
3.3. Propiedades del hormigón fresco	47



3.3.1. Consistencia	47
3.4. Propiedades físicas del hormigón endurecido	47
3.5. Propiedades mecánicas.....	48
3.5.1. Resistencia a compresión.....	48
3.5.2. Resistencia a tracción por flexión	49
3.6. Fuerza de arrancamiento de anclajes.....	50
4. Conclusiones	56
5. Bibliografía	57



Resumen

Son muchas las aplicaciones que tienen este tipo de hormigones, por ejemplo, elementos prefabricados, túneles, pavimentos, hormigón gunitado, etc. Sin embargo, en este estudio se abordará el uso de hormigones reforzados con fibras de acero en la construcción de torres eólicas de gran altura. Para analizar el comportamiento de estos hormigones se han analizado las propiedades físicas, resistencia a compresión y resistencia a tracción por flexión de los mismos.

La ubicación de las turbinas eólicas a alturas mayores da lugar a una mejor eficiencia energética. Por lo tanto, la construcción de torres de hormigón hasta alturas tan elevadas conlleva una serie de retos, como, por ejemplo, la colocación armadura convencional y los costes de mano de obra que esto conlleva. La sustitución de armadura convencional por fibras puede reducir considerablemente estos problemas constructivos.

La incorporación de fibras como refuerzo de hormigón, tiene los siguientes beneficios en comparación con la armadura convencional:

- Mejora de propiedades mecánicas como la flexotracción.
- Reducción de la deformabilidad.
- Aumento de la durabilidad mecánica.
- Control de la fisuración

Por otra parte, se ha considerado el encofrado trepante como método constructivo de las torres eólicas. Se trata de un encofrado que no precisa de estar apoyado en el suelo, sino que se apoya a la fase anteriormente ejecutada, mediante anclajes.

Se ha analizado la capacidad de este tipo de encofrados en su aplicación a los hormigones reforzados con fibras de acero. Concretamente, se han realizado ensayos de arrancamiento de los anclajes utilizados, obteniendo la fuerza de arrancamiento y el modo de fallo del anclaje.



Abstract

There are many applications that have this type of concrete, for example, prefabricated elements, tunnels, pavements, gunitate concrete, etc. However, this study will address the use of steel fiber reinforced concretes in the construction of high-rise wind towers. To analyze the behavior of these concretes, the physical properties, compressive strength and tensile strength by flexion have been analyzed.

The location of wind turbines at higher altitudes results in better energy efficiency. Therefore, the construction of concrete towers to such high heights entails a number of challenges, such as the placement of conventional armor and the labor costs that this entails. Replacing conventional reinforcement with fibers can significantly reduce these construction problems.

The incorporation of fibers as a concrete reinforcement has the following benefits compared to conventional reinforcement:

- Improvement of mechanical properties such as flexotracción.
- Decrease of deformability.
- Increased durability.
- Cracking control.

On the other hand, climbing formwork has been considered as a constructive method of wind towers. It is a formwork that does not need to be supported on the ground, but is supported by the previously executed phase, by means of anchors.

The capacity of this type of formwork in its application to concretes reinforced with steel fibers has been analyzed. In particular, the start-up tests of the anchors used have been carried out, obtaining the starting force and the failure mode of the anchor.

1. Estado del arte

1.1. Torres eólicas

1.1.1. Introducción

Según el último informe anual de Global Wind Energy Council (1), 2018 fue un buen año en cuanto a instalaciones eólicas, ya que se instalaron 51,3 GW, lo cual supone un aumento del 4% respecto a 2017.

En la siguiente imagen (Figura 1) se muestra el aumento de la potencia eólica instalada desde el año 2001:

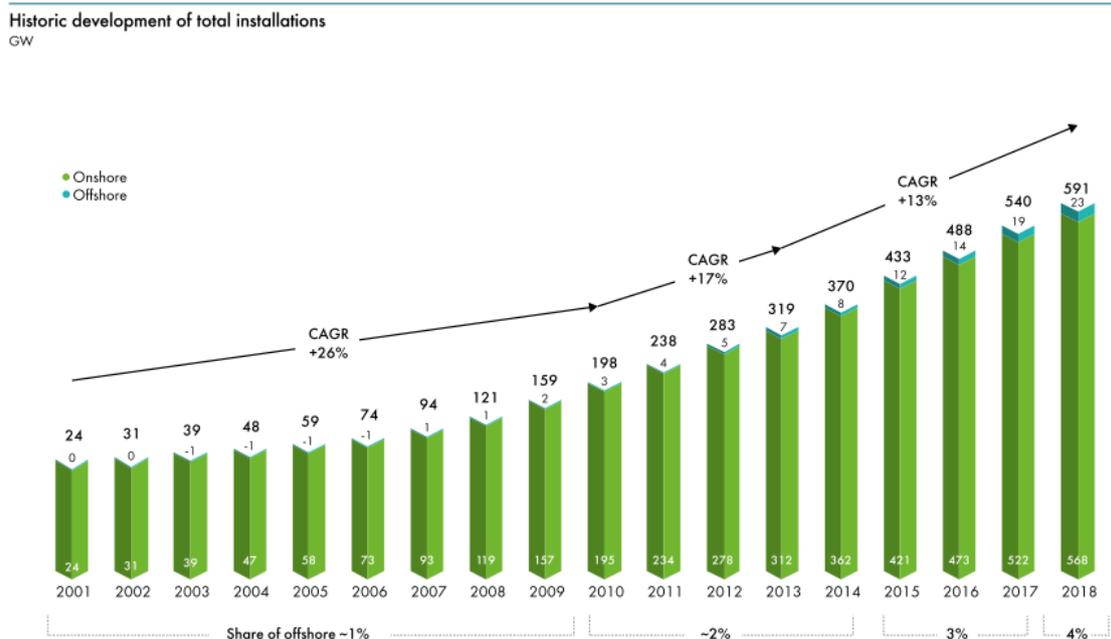


Figura 1 - Potencia eólica instalada (1).

1.1.2. Torres eólicas de gran altura

Las torres eólicas de gran altura tienen beneficios en lo que se refiere a generación eléctrica por varias razones. En primer lugar, la producción de energía eólica está relacionada con el cubo de la velocidad del viento. Además, la velocidad del viento aumenta con la altura, por lo tanto, las turbinas ubicadas a mayor altura tendrán una mejor eficiencia (2).

La tendencia de aumentar la altura de las torres eólicas hace al hormigón un material beneficioso para su ejecución por su durabilidad. Esta propiedad del hormigón juega un papel muy importante, ya que permite la ubicación de las



torres eólicas en ambientes agresivos, como por ejemplo el marino, haciendo posible la instalación de torres off-shore (3).

La construcción de torres eólicas de gran altura es un aspecto clave para la consecución de los objetivos en cuanto a la eficiencia energética. Sin embargo, la instalación de este tipo de torres da lugar a una serie de desafíos, como pueden ser, sociales, logísticos, constructivos o económicos. En cuanto a la construcción, en el caso concreto de las torres de hormigón, el aumento de altura de 40 m en los orígenes a 100 m en la actualidad genera problemas para la construcción de este tipo de torres. Por un lado, en caso de torres construidas mediante elementos prefabricados, surge una problemática relacionada con el transporte de los mismos, tanto por longitud como por diámetro. Por otra parte, el uso de hormigón in situ para la construcción de este tipo de torres, genera unos elevados costes de instalación relacionados con la mano de obra (4).

1.1.3. Métodos constructivos

Dentro de los procedimientos constructivos de las torres eólicas de hormigón podemos distinguir entre torres prefabricadas y torres construidas in situ. En primer lugar, los elementos que componen la torre se producen antes de su emplazamiento en obra y generalmente en una planta de prefabricados, a no ser que las características de estos elementos dificulten su transporte. En ese caso, la operación de prefabricado se desplaza al emplazamiento del parque eólico. En segundo lugar, dentro de las torres construidas con hormigón in situ se puede diferenciar el tipo de encofrado utilizado, ya sea trepante o deslizante. Este tipo de torres tiene limitaciones en cuanto a planificación, ya que necesita que la cimentación esté en condiciones para iniciar los trabajos y, por otra parte, la velocidad de avance estará ligada a la resistencia del hormigón inferior (5).

En el caso de torres construidas con hormigón in situ, obviamente es necesario el uso de encofrados para asegurar la forma deseada. Se pueden distinguir dos metodologías en cuanto a los encofrados. En primer lugar, el uso de encofrados trepantes conlleva una construcción discontinua de la torre, ya que el que encofrado se dispone sucesivamente sobre la estructura anteriormente ejecutada hasta alcanzar la altura deseada. La elevación del sistema se realiza mediante grúa en caso de encofrado trepante, o de forma autónoma en caso de encofrados autotrepantes (6).

Por último, el uso de encofrados deslizantes permite la industrialización de la construcción de torres ya que se utiliza el mismo encofrado, en el sentido de que no precisa de sucesivas instalaciones como el trepante. El empleo de este tipo de



encofrados permite alcanzar una velocidad de ascenso de hasta 6 m diarios, lo cual reduce considerablemente los plazos en comparación con el encofrado trepante. Además, se consigue una calidad superior, gracias a que la construcción no es discontinua y a la uniformidad de la calidad del hormigón (7).

1.2. Hormigón

1.2.1. Introducción

El hormigón se trata de un material compuesto, con unas características que lo hacen adecuado para aplicarse en estructuras de importancia que perduran por su calidad. Los compuestos del hormigón son una mezcla de áridos gruesos y finos que refuerzan una matriz de cemento, junto con adiciones para mejorar algunas características y conseguir determinados requisitos del mismo. Este conjunto de compuestos está expuesto tanto a agentes agresivos del exterior como a reacciones internas entre los mismos que pueden dar lugar a patologías o deterioros (8).

El empleo del hormigón como material estructural se remonta al Paleolítico y al Neolítico. En esa época la construcción se basaba en la unión de piedras, formando así muros de mampostería en seco. Posteriormente, se introducía mortero entre esas filas de piedras de forma que el reparto de cargas fuera más uniforme. Durante la época del Imperio Romano, el acceso a arenas volcánicas con propiedades cementicias, hizo posible la ejecución de unos morteros con capacidades físicas y mecánicas muy similares a las del hormigón empleado a la actualidad (9).

Durante el Renacimiento, se empieza a reforzar la albañilería y el hormigón con el objetivo de reducir tracciones excesivas. Sin embargo, no es hasta el siglo XIX cuando la asociación del acero y el hormigón supuso una revolución en lo que a materiales de construcción se refiere (10).

1.2.2. Estructura y matriz del hormigón

Originalmente, el hormigón era una mezcla de cemento, agua y áridos. Por lo tanto, para conseguir una cualidad determinada del mismo, bastaba con modificar la proporción de cada uno de los componentes (11).

En el caso de los áridos, una combinación adecuada de áridos gruesos y finos, da lugar a un contenido de pasta de cemento mínimo. Esto permite reducir el contenido de cemento, obtener hormigones más económicos, con mayor estabilidad volumétrica y un menor calor de hidratación (12).



En cuanto al cemento, su producción conlleva un elevado coste energético, por lo tanto, con el paso del tiempo, la incorporación de materiales inorgánicos, denominado adiciones materiales es cada vez más frecuente. Estas adiciones pueden proceder de depósitos naturales o bien, pueden tener su origen en desechos industriales, por lo que su coste es menor en comparación con el cemento convencional. Por lo tanto, la incorporación como adiciones, supone una revalorización para las cenizas volantes, humo de sílice, escorias, etc. (13).

En definitiva, los hormigones modernos no son simples mezclas de cemento, agua y áridos, sino que la presencia de adiciones minerales y aditivos químicos permite conseguir propiedades específicas. Por lo tanto, el hormigón se ha convertido en un material químico, que requiere la optimización de la dosificación de sus componentes (14).

1.2.3. Árido del hormigón

Como se establece en el artículo 28 de la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08, para la fabricación de hormigones pueden emplearse áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas), rodados o procedentes de rocas machacadas, así como escorias siderúrgicas enfriadas por aire, según la norma UNE-EN 12620 (15), y en general, cualquier otro tipo de árido cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica y se justifique debidamente.

Para la designación de los áridos se empleará el siguiente formato:

$$d/D - IL - N$$

Siendo:

- d/D : Fracción granulométrica, comprendida entre un tamaño mínimo de árido, d , y un tamaño máximo, D , en mm.
- IL: Forma de presentación, R (rodado), T (triturado), M (mezcla)
- N: Naturaleza de presentación, C (calizo), S (silíceo), G (granito), O (ofita), B (basalto), D (dolomítico), Q (traquita), I (fonolita), V (varios), A (artificial) R (reciclado).

La granulometría de los áridos se obtiene según UNE-EN 933-2 (16) en base a la utilización de una serie básica de tamices:

$$125 < 63 < 31,5 < 16 < 12,5 < 10 < 8 < 6,3 < 4 < 2 < 1 < 0,5 < 0,25 < 0,125 < 0,063$$



El árido grueso se corresponde con la fracción del árido de mayor tamaño, la cual, tendrá un tamaño máximo superior a 4 mm y un tamaño mínimo superior a 2 mm. Por lo tanto, el árido fino, tendrá un tamaño máximo inferior a 4 mm.

1.2.4. Refuerzo para el hormigón

El hormigón tiene una resistencia muy alta a compresión, pero muy baja a tracción. Por lo tanto, para conseguir que trabaje de igual manera a tracción que a compresión, se dota al mismo de otro material que actúe como refuerzo en las zonas susceptibles de sufrir esfuerzos de tracción.

En caso de emplear elementos de acero para refuerzo de hormigón, se puede diferenciar entre armaduras activas y armaduras pasivas.

En primer lugar, el artículo 33 de la EHE-08, define la armadura pasiva como el resultado de montar, en el correspondiente molde o encofrado, el conjunto de armaduras normalizadas, armaduras elaboradas o ferrallas armadas que, convenientemente solapadas y con los recubrimientos adecuados, tienen una función estructural. Según UNE-EN 10080 (17), los productos de acero que pueden emplearse para la elaboración de armaduras pasivas pueden ser:

- Barras rectas o rollos de acero corrugado soldable.
- Alambres de acero corrugado o grafilado soldable.
- Alambres lisos de acero soldable.

Por otra parte, en el artículo 35 de la EHE-08, se denominan armaduras activas a las disposiciones de elementos de acero de alta resistencia mediante las cuales se introduce la fuerza de pretensado en la estructura. Según UNE 36094 (18), se emplean los siguientes productos de acero como armaduras activas:

- Alambre: producto de sección maciza, liso o grafilado, que normalmente se suministra en rollo.
- Barra: producto de sección maciza que se suministra solamente en forma de elementos rectilíneos.
- Cordón: producto formado por un número de alambres arrollados helicoidalmente, con el mismo paso y el mismo sentido de torsión, sobre un eje ideal común. Los cordones se diferencian por el número de alambres, del mismo diámetro nominal y arrollados helicoidalmente sobre un eje ideal común y que pueden ser 2, 3 o 7 cordones.

Otra forma de reforzar los hormigones es con la incorporación de fibras al mismo. Con su aplicación se busca reducir la mano de obra relacionada con su



colocación, aumentar la durabilidad y, por último, reducir el uso o sustituir completamente la armadura convencional anteriormente mencionada (19).

1.3. Fibras para hormigón

1.3.1. Introducción

La incorporación de fibras como refuerzo de hormigón tiene como objetivo proporcionar al mismo una isotropía y homogeneidad uniforme. La efectividad de estas fibras, en cuanto a la mejora de las características del hormigón, depende de muchos factores, principalmente de la naturaleza y del tipo de fibra utilizado (20).

1.3.2. Tipología

Las fibras más empleadas para el refuerzo de hormigones son minerales (vidrio), sintéticas (polipropileno) y metálicas (acero):

Fibras de vidrio

Las fibras de vidrio presentan unas buenas características para actuar como refuerzo de hormigones. Sin embargo, este tipo de fibras reaccionan negativamente frente a la humedad y las soluciones alcalinas y ácidas. Por lo tanto, además de soportar las cargas a las que esté sometido el hormigón, para que las fibras de vidrio sean un refuerzo idóneo, necesitan ser resistentes a los álcalis del hormigón (22).

Fibras de polipropileno

Las fibras de polipropileno, aunque tienen otros beneficios, se usan principalmente para reducir la fisuración por contracción del hormigón. No proporcionan un refuerzo estructural significativo, sin embargo, son empleadas como refuerzo secundario. La aparición de fisuras por contracción se produce durante las primeras 24 horas después de la colocación del hormigón, por lo tanto, las fibras de polipropileno constituyen un elemento de refuerzo durante el estado fresco del hormigón (23).

Por otra parte, no sufren alteraciones ante los efectos de ambientes alcalinos. Sin embargo, incrementos en la temperatura de curado dan lugar a modificaciones en la superficie de la fibra (24).

Fibras de acero

En comparación con el resto de las fibras empleadas como refuerzo del hormigón, las de acero poseen mejores prestaciones en lo que se refiere a resistencia y módulo elástico. Se encuentran embebidas dentro de la matriz del hormigón, que proporciona un ambiente alcalino que permite que se encuentren protegidas ante los agentes causantes de la corrosión. Suele utilizarse el acero inoxidable en caso de que el hormigón esté expuesto a ambientes altamente corrosivos o a altas temperaturas (25).

En la norma UNE 83500-1(26), se establece una tipología de fibras de acero en función del proceso utilizado para su fabricación:

- Tipo I: Trefilado en frío.
- Tipo II: Corte en láminas.
- Tipo III: Extracción por rascado en caliente.
- Tipo IV: Otros.

Por otro lado, la norma UNE-EN 14889-1 (21) establece las características geométricas de las fibras aptas para su utilización como refuerzo de hormigones. La geometría de las fibras tiene especial importancia en cuanto a la respuesta del hormigón frente a sollicitaciones tanto externas como internas. Hay una gran variedad de fibras tanto por naturaleza como por características geométricas, cada una con sus ventajas e inconvenientes.

La efectividad de las fibras será mayor en la medida en que se consiga una mayor adherencia de las mismas con el propio hormigón, y que depende únicamente de la geometría de las fibras. Para definir dichas características habrá que especificar la sección (Figura 2) y la forma geométrica de las fibras (Figura 3).



Figura 2. Secciones transversales de las fibras.

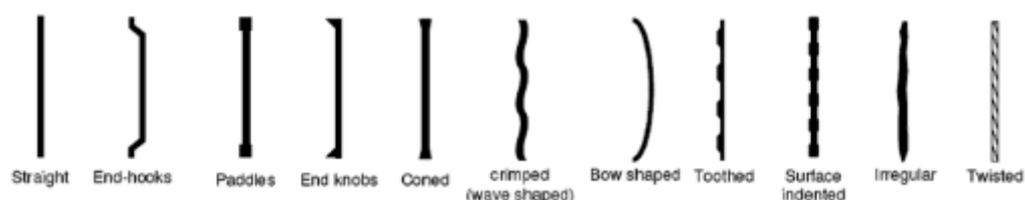


Figura 3. Forma geométrica de las fibras.

La caracterización geométrica de las fibras se establece en base a los siguientes parámetros:

- l : longitud de la fibra (mm).
- d : diámetro o diámetro efectivo de la fibra (mm).
- e : esbeltez o relación l/d .
- A : área de la sección transversal (mm^2).

1.4. Hormigones reforzados con fibras

1.4.1. Dosificación, amasado y puesta en obra

La presencia de fibras no exige la utilización de materiales específicos para la fabricación de hormigón, aunque la norma (27) exige que la menor longitud de los moldes debe ser igual o mayor de 3 veces el tamaño máximo de los áridos y 2 veces el tamaño de las fibras. Así mismo, la longitud de la fibra (l_f) se recomienda sea, como mínimo, 2 veces el tamaño del árido mayor. Es usual el empleo de longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. Sin embargo, hay que prestar especial atención a los problemas que conlleva su incorporación. La primera limitación de este tipo de hormigones es la reducción de su trabajabilidad, lo cual dificulta su puesta en obra. Por otra parte, la segregación de las fibras, provocada por una mala distribución de estas, puede dar lugar a la aparición de “pelotas de fibras” o “erizos” (28).

La incorporación de fibras supone un aumento del volumen de la mezcla, por lo que también se ve modificado el volumen de agua de amasado por m^3 . El empleo de áridos de machaqueo será válido en caso de que no generen problemas de docilidad de la mezcla, ya que precisan una mayor cantidad de agua para obtener una determinada docilidad dada su absorción. En caso contrario, será necesario la utilización de áridos rodados. Por último, el volumen de fibras presentes en la mezcla vendrá determinado por la longitud y la esbeltez de estas (29).

Durante la puesta en obra del hormigón reforzado con fibras debe evitarse interrupciones, ya que se provocaría una alteración de la distribución de las fibras. En cuanto al vibrado, dado que la trabajabilidad de este tipo de hormigones es peor, será necesario una mayor energía de compactación. Sin embargo, los hormigones reforzados con fibras tienen mejor respuesta a los convencionales, por lo que para obtener una docilidad determinada será necesario menor tiempo de vibrado (30)



1.4.2. Hormigones reforzados con fibras de acero

Los hormigones reforzados con fibras de acero están formados básicamente por una mezcla de un conglomerante hidráulico, generalmente cemento, áridos finos y gruesos, agua y fibras de acero (25).

1.4.3. Propiedades físicas

La trabajabilidad del hormigón decrece uniformemente con el aumento del contenido de fibras de la mezcla. Parámetros como la esbeltez o el porcentaje de fibras largas y cortas presentes en la mezcla, son parámetros a tener en cuenta para obtener una trabajabilidad específica. La docilidad del hormigón será menor en la medida en que la esbeltez de las fibras sea más baja. Por otra parte, para la obtención de buenos valores de trabajabilidad del hormigón es conveniente que se aumente el porcentaje de fibras cortas en comparación con el porcentaje de fibras largas (31).

1.4.4. Propiedades mecánicas

Resistencia a compresión uniaxial.

Yacizi et al. demostraron que el uso de fibras de acero como refuerzo de los hormigones incrementa en un 4-19% la resistencia a compresión uniaxial de los mismos (32).

En cambio, otros estudios (Olivito, R.S. y Zuccarello, F.A.) indican que la presencia de las fibras no da lugar a incrementos significativos de la resistencia a compresión. Sin embargo, en cuanto al modo de fallo, las fibras de acero hacen que cambie drásticamente de frágil a dúctil (33).

El estudio de Mohammadi, Y., Singh, S.P. y Kaushik, S.K. analiza la influencia del volumen de fibras presentes en la mezcla y la longitud de las mismas en la capacidad resistente de los hormigones. En cuanto a la resistencia a compresión, se produce un aumento que varía entre el 3% y el 26%. Concluyó que a mayor presencia de fibras cortas (25 mm) sobre fibras largas (75 mm) en la mezcla el aumento de la resistencia será mayor (31).

Samarakoon S., Ruben P., Wie Pedersen J. y Evangelista L. analizaron las propiedades mecánicas de los hormigones reforzados con fibras de acero, concretamente, aquellas fibras provenientes del reciclaje de neumáticos. En el caso de la resistencia a compresión, la utilización de este tipo de fibras dio lugar a un aumento del 5-12% (34).



La orientación de las fibras presentes en la mezcla tiene poco impacto en la resistencia a compresión resultante, por lo tanto, ésta es más dependiente de las características del hormigón base (35).

Resistencia a tracción indirecta.

La incorporación de fibras de acero al hormigón da lugar a un aumento de la resistencia a tracción indirecta de entorno al 11-54% (32).

La resistencia a tracción indirecta aumenta, respecto a hormigones sin refuerzo, en un 59% para un porcentaje de fibras del 2%, y una proporción de fibras largas del 65% frente a un 35% de fibras cortas (31).

Resistencia a flexotracción.

En el caso de los hormigones reforzados con fibras de acero, la resistencia a flexotracción aumenta considerablemente con el aumento del "aspect ratio" y del volumen de fibras presentes en la mezcla. Concretamente el aumento de la resistencia está entorno al 3-81% respecto a los hormigones sin refuerzo. Para un determinado volumen de fibras presentes en la mezcla, la resistencia a flexotracción del hormigón aumenta en la medida en que el parámetro que relaciona la longitud y el diámetro de las fibras (l/d) es mayor (32).

Para mezclas con un volumen de fibras de un 2% en las que tengan mayor presencia fibras largas sobre fibras cortas se observa un aumento de la resistencia a flexión del 100% (31).

1.4.5. Aplicaciones

La presencia de fibras de acero como refuerzo de los hormigones es un aspecto a tener en cuenta, ya que hace que la capacidad de absorción de energía aumente considerablemente, lo cual hace que puedan tener la efectividad requerida en diversas aplicaciones (36).

Una de las aplicaciones del hormigón reforzado con fibras de acero es la construcción de túneles, donde, además de aprovechar las ventajas en cuanto a las propiedades mecánicas, también tiene el beneficio de reducir los costes que supone la colocación de la armadura convencional (37).

Los hormigones reforzados con fibras de acero también son de aplicación en la ejecución de pavimentos. En comparación con los pavimentos construidos con hormigones convencionales, tienen mejores características mecánicas, lo que se traduce en una reducción del espesor del pavimento. Sin embargo, el aspecto en el que es más influyente la incorporación de las fibras es en la aparición de fisuras



y en el control de las mismas. Principalmente son empleados en aeropuertos, donde los pavimentos están sometidos a altas cargas, que son resistidas gracias a la resistencia al impacto proporcionada por las fibras (38).

En el caso de pavimentos para carreteras, el uso de fibras de acero puede llegar a reducir el espesor de las losas hasta un 25% (39).

Otra aplicación posible es la industria de los elementos prefabricados de hormigón. En este caso, la producción de hormigón reforzado con fibras de acero en plantas de elementos prefabricados requeriría una tecnología más exigente que en el caso de hormigón convencional. Sin embargo, se consigue reducir la fisuración de este tipo de productos además de lograr una mejor apariencia y durabilidad (40).

Los hormigones reforzados con fibras de acero también son de aplicación en las torres eólicas de hormigón, ya que para el diseño de las mismas es necesario la optimización del espesor. La utilización de estos hormigones, mediante la sustitución de la armadura pasiva convencional, permiten la reducción del espesor de las paredes de las torres (41)

1.5. Anclajes para hormigón

1.5.1. Introducción

En este estudio, los anclajes tienen su aplicación durante la construcción de las torres eólicas, concretamente, mediante el método constructivo de los encofrados trepantes. En este caso, los anclajes empleados han sido cedidos por ULMA (Figura 4).

Los anclajes están compuestos por una barra roscada (o dywidag), la cual se puede ajustar para modificar la longitud embebida dentro de los bloques. Gracias a esta capacidad, en este caso, se ha adaptado el anclaje para la longitud embebida sea igual al mínimo permitido, logrando así estar en la peor situación posible, situándonos en el lado de la seguridad.



Figura 4. Anclaje empleado en los ensayos.

1.5.2. Tipología de anclajes

Los sistemas de anclaje se pueden dividir en dos grupos, por una parte, se encuentran los anclajes ejecutados in situ, es decir, aquellos que se colocan en las estructuras antes de que se coloque el hormigón, y los sistemas instalados en hormigón endurecido, los cuales se colocan en perforaciones realizadas después de que el hormigón haya curado (42).

Dentro de los sistemas anclajes hormigonados in situ, se pueden diferenciar los siguientes tipos:

- Bulones comunes (Figura 5): Se trata de bulones de acero estructural colocados con su cabeza dentro del hormigón.

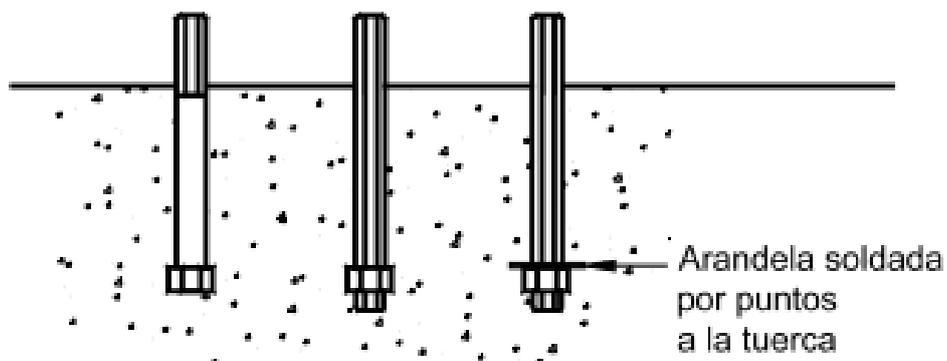


Figura 5. Bulones comunes (42).

- Bulones en “J” o “L” terminados en gancho (Figura 6): Están compuestos por barras roscadas dobladas, lisas o conformadas.

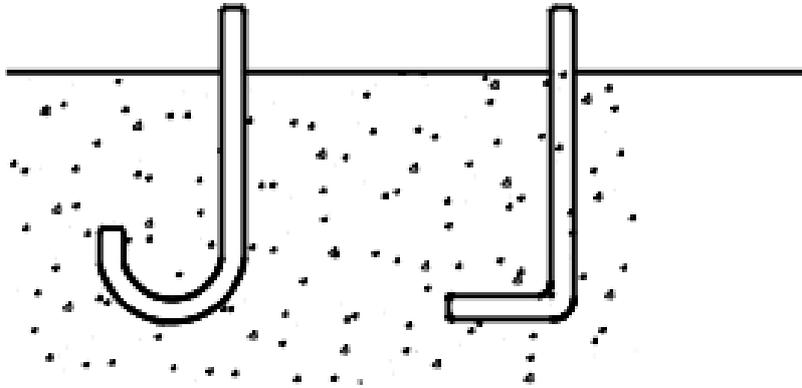


Figura 6. Bulones en “J” o “L” (42).

- Barras roscadas (Figura 7): A diferencia del caso anterior, estos anclajes son rectos, generalmente con rosca gruesa.

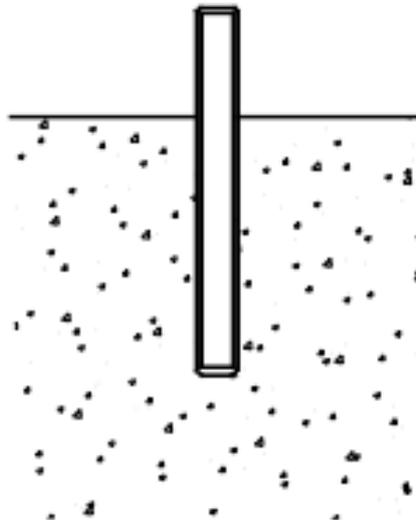


Figura 7. Barras roscadas (42).

- Barras para armaduras (Figura 8): Barras genéricas empleadas para armaduras.

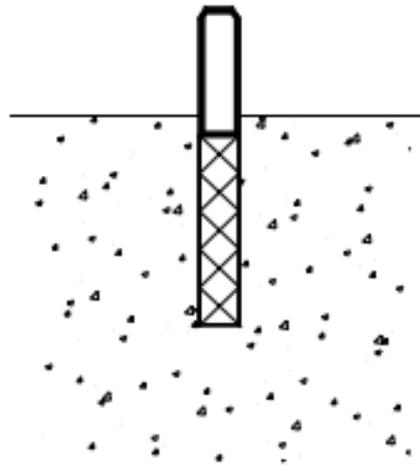


Figura 8. Barras para armaduras (42).

- Insertos roscados (Figura 9): Insertos roscados o férrulas roscadas internamente, o bobinas, generalmente fabricados con roscas internas o externas.

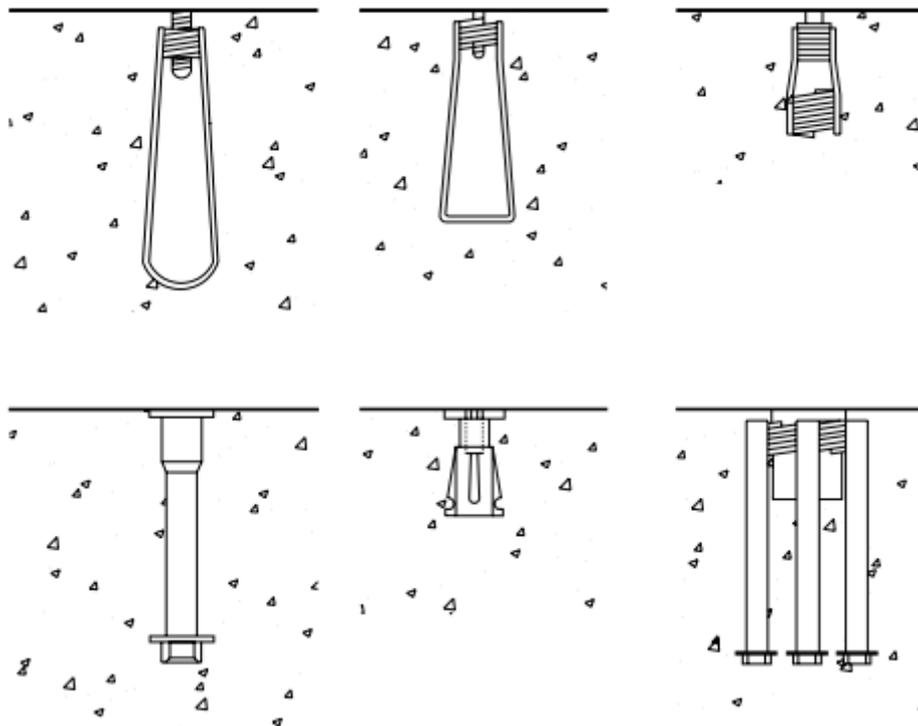


Figura 9. Insertos roscados (42).

- Placas para soldadura de pernos (Figura 10): Placas de acero con barras de acero terminadas en gancho, barras conformadas o pernos de anclaje con cabeza.

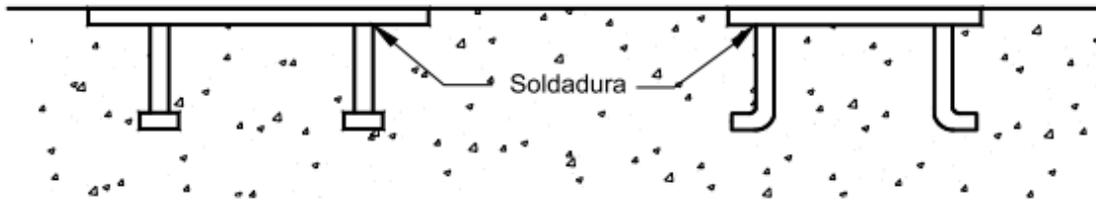


Figura 10. Placas para soldadura de pernos (42).

- Conexiones abulonadas (Figura 11): Este tipo de anclaje consiste en bulones con cabeza, tales como los conectores embebidos o instalados en agujeros pasantes.

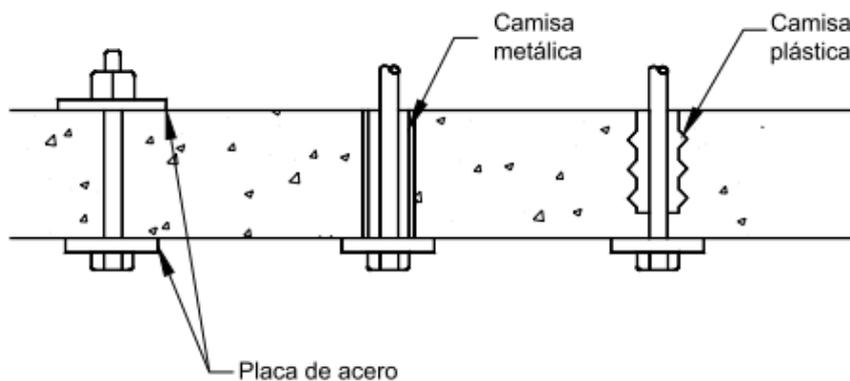


Figura 11. Conexiones abulonadas (42).

En el caso de los sistemas de anclaje instalados en hormigón endurecido, se pueden distinguir dos grupos, los anclajes cementados y los anclajes de expansión:

- Anclajes cementados (Figura 12): Este primer tipo de anclajes consiste en bulones con o sin cabeza o barras roscadas que se alojan en orificios practicados previamente en el hormigón y que se fijan al mismo mediante la utilización de morteros (anclaje cementado) o de compuestos químicos (anclaje químico).

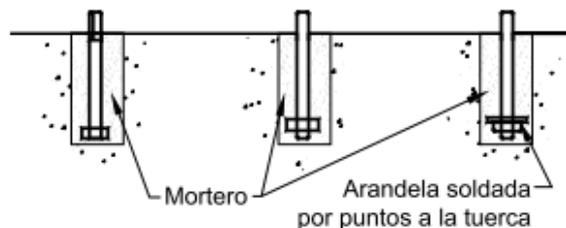


Figura 12. Anclaje cementado (42).

- Anclajes de expansión (Figura 13): Al igual que los anclajes cementados, los anclajes de expansión se insertan en perforaciones realizadas en hormigón que ya ha curado. Sin embargo, para fijarse al hormigón, estos anclajes se expanden mediante el ajuste de una tuerca, martillando el anclaje o bien expandiéndolos en el interior de un rebaje o muesca del hormigón.

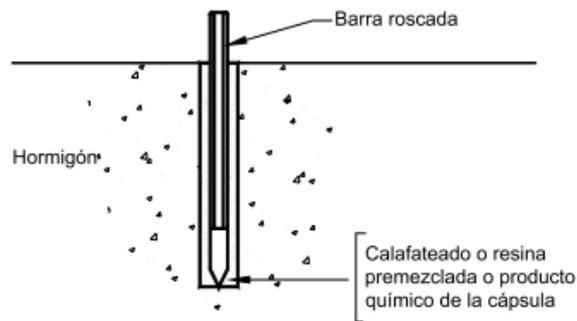


Figura 13. Anclaje de expansión (42).

1.5.3. Comportamiento de los anclajes

La resistencia de los anclajes hormigonados in situ se incrementa con el espesor del elemento en el que está instalado y con la resistencia característica del hormigón. Por otra parte, el modo de fallo habitual de este tipo de anclajes es por desprendimiento de un cono de hormigón (43).

El comportamiento de los anclajes cementados puede diferenciarse en función de la longitud embebida de los mismos en el hormigón. En caso de que esta longitud sea corta, el modo de fallo habitual es el de desprendimiento de un cono de hormigón. Mientras que, si el anclaje está lo suficientemente embebido en el hormigón, el modo de fallo que aparece es una combinación entre desprendimiento de un cono de hormigón y deslizamiento del anclaje (44).

1.5.4. Comportamiento de los anclajes en hormigón con fibras

Tóth, Bokor y Sharma (45) analizaron el comportamiento de los anclajes embebidos en hormigones reforzados con fibras de acero con el objetivo de validar su aplicabilidad en este tipo de hormigones. Los ensayos realizados dan lugar a una mejora significativa del comportamiento de los anclajes en comparación con los instalados en hormigón convencional. Especialmente, esta mejora se produce en los modos de fallo por desprendimiento de un cono de hormigón y por rotura del borde del elemento. En cualquier caso, será recomendable una adecuada compactación de la mezcla para garantizar un correcto funcionamiento de los anclajes (45).

2. Materiales y metodología

2.1. Determinación de la densidad del cemento

La densidad del cemento se obtuvo siguiendo lo establecido en la norma UNE 80103: "Métodos de ensayos de cementos. Determinación de la densidad real" (46).

Para la realización del ensayo fue necesario un horno para el secado del cemento, una balanza de precisión con una resolución de 0,01 gr, un matraz de Le Chatelier de 0,24 cm³ (Figura 14) y un líquido que no reaccione con el cemento, por lo general se emplea alcohol.



Figura 14. Material para la determinación de la densidad del cemento.

En primer lugar, se tomó una muestra de cemento, secada en el horno a una temperatura de 105°C durante 24 horas, esperando el tiempo oportuno para que se atempere antes de llevar a cabo los siguientes pasos.

Seguidamente, se acondicionó el matraz para el ensayo, lavándolo y aclarándolo antes de introducir el alcohol, hasta un nivel comprendido entre 0 y 1 cm³, anotando el nivel que alcanza la parte superior de la burbuja, v_i , y el peso del conjunto p_i .

A continuación, se vertió el cemento, realizándolo cuidadosamente con una cucharilla y un pequeño embudo de forma que no se produzcan tapones ni salpicaduras. Una vez vertido el cemento, se removi6 el matraz con suaves movimientos, circulares y horizontales, incluso inclinándolo verticalmente el recipiente, con el objetivo de desprender aquellas cantidades que hubieran quedado adheridas a las paredes interiores del recipiente.

Con la incorporación del cemento, el nivel del conjunto alcanzó una de las marcas superiores del matraz. En este momento, se anotaron los valores finales tanto de volumen v_f , como de peso p_f .

Entre las anotaciones iniciales y finales se produce una diferencia tanto en volumen, producida por el volumen que ocupa el cemento dentro del líquido, como en peso, provocada por la masa de cemento incorporada al recipiente. Obteniendo así la densidad del cemento (1), entendida como el incremento de masa entre el incremento de volumen:

$$d_R = \frac{P_f - P_i}{V_f - V_i} \tag{1}$$

2.2. Caracterización de los áridos

Los áridos empleados (Figura 15) para la fabricación del hormigón fueron áridos calizos que proceden de una de las cantera de Hormisa, en concreto de la de Arce-Piélagos (Figura 16).



Figura 15. Áridos calizos empleados en la fabricación del hormigón.



Figura 16. Cantera de Hormisa, en el municipio de Arce.

La caracterización de los áridos conlleva la determinación de una serie de propiedades geométricas y físicas. En concreto, se determinaron la granulometría, densidad y absorción de las distintas fracciones de áridos. Las fracciones empleadas en la fabricación de hormigón para el presente proyecto son:

- 0/2: Árido calizo con fracciones inferiores a 2mm.
- 0/4: Árido calizo con fracciones inferiores a 4mm.
- 4/12: Árido calizo con fracciones comprendidas entre 4 y 12mm.
- 10/20: Árido calizo con fracciones comprendidas entre 10 y 20mm.

2.2.1. Granulometría

Para la determinación de la granulometría de los áridos presentes en el hormigón se tuvo en cuenta la norma UNE-EN 933-1: “Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado” (47).

En primer paso fue secar la porción de árido seleccionada para el ensayo en horno a una temperatura de 105°C hasta que no se produzca variación de masa. A partir de ahí, se pudo obtener el peso seco de la muestra.

El siguiente paso fue el tamizado de los áridos en una tamizadora de vaivén (Figura 17). Para ello fueron utilizados una serie de tamices, que se colocarán

desde el más pequeño hasta por el que pasa el 100% de los áridos. La serie de tamices utilizados (mm) fue:

$$20 < 16 < 12,5 < 10 < 8 < 6,3 < 4 < 2 < 1 < 0,5 < 0,25 < 0,125 < 0,063$$

Tras 2 minutos en la tamizadora, la cantidad de material retenida por cada uno de los tamices fue pesada para la obtención de la curva granulométrica de las distintas fracciones. Esta curva representa el porcentaje de masa retenido en cada tamiz y es fundamental para la dosificación del hormigón. Estos porcentajes pueden calcularse como (2):

$$ret_n (\%) = \frac{m_{ret}}{m_t} \cdot 100 \tag{2}$$

Siendo:

- m_{ret} la masa de material retenida en cada fracción.
- m_t la masa total de material.



Figura 17. Tamizadora de vaivén.

2.2.2. Determinación de la densidad

La determinación de la densidad de los áridos es importante, en el sentido de que es una de las principales características a la hora de considerar su idoneidad para su utilización como agregado para el hormigón. Además, sirve para contrastar los valores proporcionados por los fabricantes.

Las fracciones 0/2 y 0/4 se ensayaron utilizando un picnómetro o volumenómetro de Le Chatelier, siguiendo un procedimiento análogo al realizado para la determinación de la densidad del cemento.

En el caso de las fracciones 4/12 y 10/20 el recipiente empleado para realizar el ensayo no es el picnómetro, sino un matraz aforado de 250 ml (Figura 18). En este caso, el primer paso fue introducir agua hasta que alcance una marca en el cuello del recipiente, pesando el conjunto del recipiente más el agua, definido por P_1 .

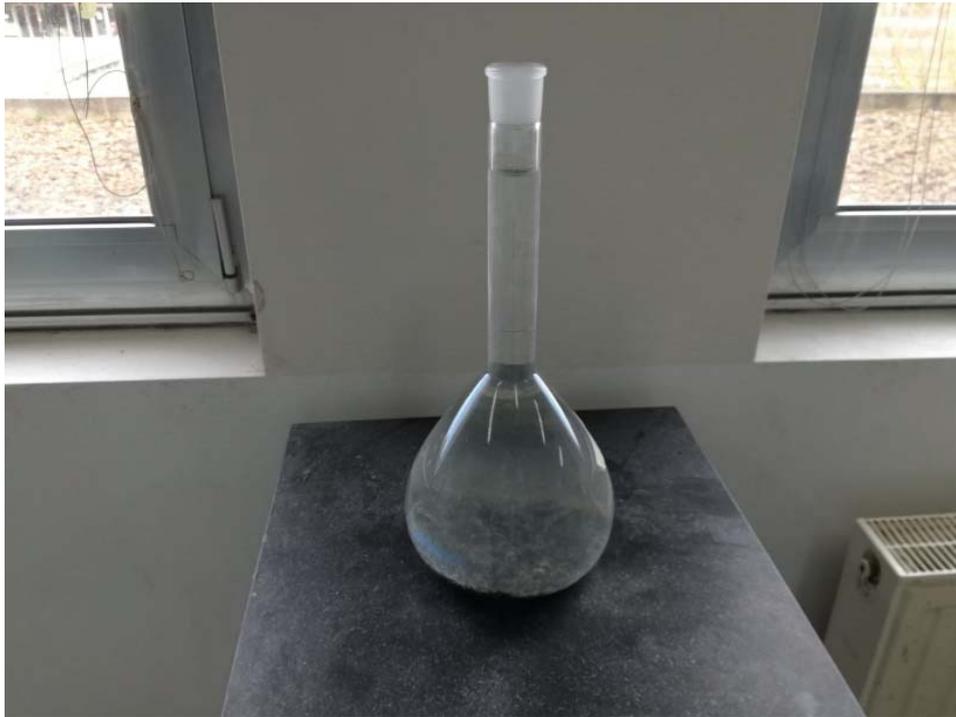


Figura 18. Matraz aforado para áridos gruesos.

Seguidamente, se introdujo el árido de la fracción en cuestión con precaución, de forma que se asegure no perder material durante el vertido del mismo, hasta un nivel cercano a la boquilla de ensanche del cuello del recipiente. De nuevo, se pesó el conjunto, en este caso teniendo en cuenta el recipiente, el agua y el árido, obteniendo P_2 .

Por último, se llevó a cabo la extracción de agua hasta la marca de enrase del mismo. En ese momento, se pesó de nuevo el conjunto, obteniendo P_3 .

Una vez obtenidos estos pesos, se calculó la densidad del árido (3), expresada como la relación entre el peso de material bruto introducido en el recipiente y el peso de agua desalojado del mismo para ese mismo volumen, considerando la densidad del agua la unidad.

$$d_R = \frac{P_2 - P_1}{P_2 - P_3} \quad (3)$$

2.2.3. Determinación del coeficiente de absorción

Para la obtención de la absorción de los áridos se utilizaron las medidas realizadas para el cálculo de las densidades. Por lo tanto, en base a los resultados del apartado anterior, el coeficiente de absorción expresado como porcentaje en peso, viene dado por la siguiente expresión:

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{P_{SSS} - P_s}{P_s} \cdot 100 \quad (4)$$

2.3. Fibras

Las fibras empleadas para el refuerzo del hormigón proceden de ArcelorMittal y, concretamente pertenecen al tipo HE (Figura 19). Se trata de fibras de extremos en gancho y son el tipo de fibras más empleado para reforzar hormigones. Son adecuadas para todo tipo aplicaciones y están disponibles en diferentes longitudes, diámetros y resistencias a tracción.

En este caso, el tipo de fibra empleado es el HE 90/60 (Figura 20), lo cual quiere decir que se trata de fibras de 60 mm de longitud y 0,090 mm de diámetro, por lo tanto poseen una esbeltez de 67. Además, tienen una resistencia a tracción de 1200 N/mm².



Figura 19. Fibras HE 90/60 utilizadas.

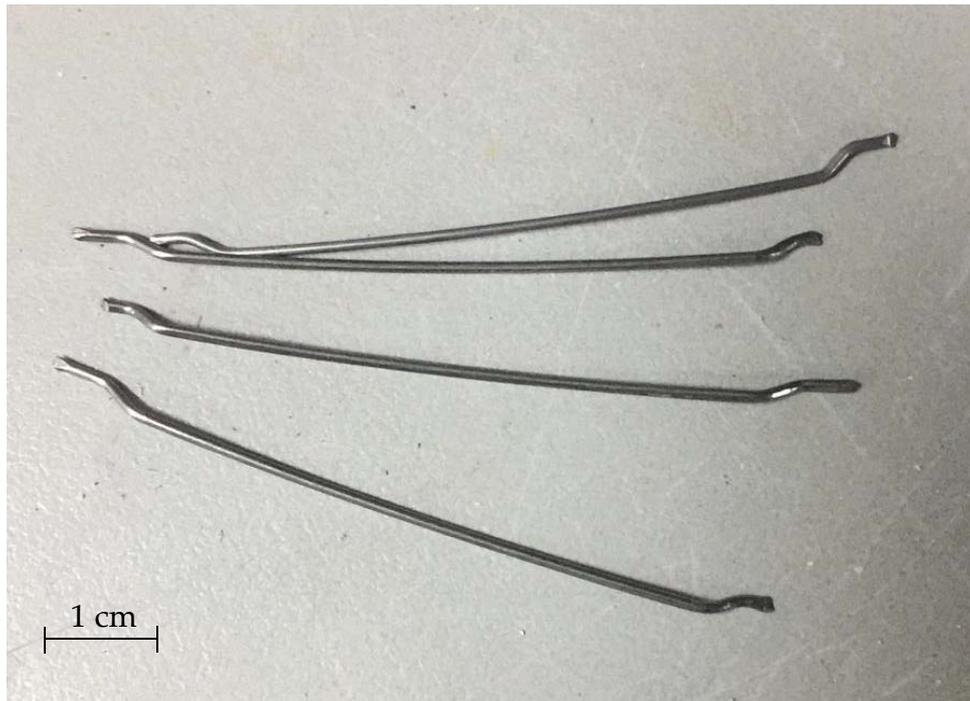


Figura 20. Detalle de las fibras utilizadas.

2.4. Propiedades del hormigón en estado fresco

2.4.1. Dosificación del hormigón

La dosificación del hormigón se ha realizado mediante el método Fuller. Este método consiste en la dosificación de los áridos en base a una curva de referencia, que representa una granulometría continua y que favorece la compenetración de los granos, consiguiendo así, una buena docilidad y densidad del conjunto.

La dosificación tenía el objetivo de conseguir la fluidez deseada. En este caso, la consistencia a obtener mediante el ensayo del cono de Abrams era un asiento mayor de 18 cm, con el objetivo de que el hormigón fuese bombeable.

Los materiales empleados (Figura 21) para la dosificación del hormigón son los siguientes:

- Fibras metálicas tipo Hooked, de 60 mm de longitud y 0,090 mm de diámetro.
- 4 tamaños de árido calizo.
- Cemento tipo I, 52,5N.
- Agua.
- Aditivo superplastificante MasterEase 5025.



Figura 21. Materiales para la dosificación.

En primer lugar, se realizó la dosificación que daba lugar a la fluidez buscada, sin incorporar las fibras a la mezcla, como se muestra en las siguientes imágenes (Figura 22).



Figura 22. Cono de Abrams de la primera dosificación.

Posteriormente, con la adición de las fibras se observó una reducción drástica de la trabajabilidad del hormigón (Figura 23).



Figura 23. Cono de Abrams de la segunda amasada.

Esta disminución de la trabajabilidad del hormigón obligó a hacer pruebas en distintas amasadas posteriores, aumentando tanto el agua como el aditivo, hasta que se logró conseguir la consistencia deseada en el hormigón con contenido de fibras y, por tanto, la dosificación definitiva, que diera lugar a una docilidad del hormigón aceptable.

La dosificación finalmente empleada (Tabla 1) fue la siguiente:

Tabla 1. Dosificación empleada.

Material	Dosificación (kg/m³)
Arena caliza 0/2	480
Arena caliza 0/4	480
Gravilla 4/12	480
Gravilla 10/20	480
Cemento CEM I 52,5N	390
Agua	165
Aditivo MasterEase 5025	3,9
Fibras metálicas HE 90/60	35
w/c (efectiva)	0,42

2.4.2. Fabricación y curado de probetas

Una vez realizadas las pruebas en laboratorio y habiendo obtenido la consistencia deseada, dada la cantidad de hormigón que debía fabricarse, se optó por realizar el mismo en la planta de hormigón y traerlo hasta el laboratorio en camión hormigonera. Se construyeron probetas para las propiedades físicas, los ensayos de resistencia a compresión, los ensayos a tracción por flexión y fuerza de arrancamiento de anclajes.

Para los ensayos de resistencia a compresión se fabricaron probetas cúbicas de dimensiones 15x15x15 cm, para lo cual se emplearon moldes normalizados de plástico (Figura 24).



Figura 24. Moldes para probetas cúbicas.

Para la determinación de las propiedades físicas y la obtención de la resistencia a tracción por flexión se construyeron probetas prismáticas de dimensiones 60x15x15 cm.

Por último, los bloques destinados al arrancamiento se fabricaron al igual que el caso de las probetas prismáticas con moldes de madera, de dimensiones 1,20x1,20x0,40 m (Figura 25).



Figura 25. Fabricación de los moldes.

Antes de la fabricación de los bloques, hubo que disponer una serie de refuerzos para que soportaran la presión del hormigón durante su vertido (Figura 26).



Figura 26. Refuerzo de los moldes.

Antes del llenado de los moldes descritos anteriormente, estos fueron provistos de una fina capa de aceite a modo de desmoldante para así, favorecer el desmoldado. Después se produjo al vertido del hormigón (Figura 27) en cada uno de los bloques y en las probetas.

La compactación de las probetas se realizó mediante aguja. Este método de compactación consiste en la introducción de la aguja de forma vertical y rápida sin llegar a tocar el fondo del molde, manteniendo esta posición durante unos 10-15 segundos, hasta que aparezcan burbujas de aire en la superficie libre de hormigón. Momento en el que se procedió a la extracción de la aguja, mediante un movimiento lento, de forma que el agujero del propio cabezal se rellenasen por sí mismo.

En el caso de las probetas cúbicas y las prismáticas, el vibrado se realizó adicionalmente en la superficie exterior del molde, ya que, al tratarse de moldes de pequeña sección, la introducción de la aguja puede suponer un vaciado importante del molde.

Por último, y una vez realizada la compactación, se enrasó el molde con una paleta fina mediante movimientos circulares y alisando posteriormente la superficie mediante movimientos de vaivén. Posteriormente, los moldes se colocaron en una superficie llana.



Figura 27. Fabricación de probetas.

En cuanto al curado de las probetas, hay que distinguir las condiciones de curado de las probetas cúbicas y prismáticas para los ensayos de resistencia a compresión y a la tracción por flexión y las condiciones de curado de los bloques para la determinación de la fuerza de arrancamiento.

Las probetas cúbicas y prismáticas ensayadas a las 10 horas se curaron en una bañera de agua (Figura 28) simulando las condiciones reales de curado gracias a la utilización de un equipo de control diferencial HMI, también denominado CHARI (Control de Hormigón de Alta Resistencia Inicial), que permite controlar las temperaturas del hormigón recién vertido y de las probetas a ensayar posteriormente. Este equipo dispone de tres salidas con tres termopares que miden la temperatura ambiente, la temperatura del hormigón y la temperatura de la probeta, activando las resistencias para el calentamiento del agua de la bañera cuando la temperatura del hormigón es superior a la de la probeta y, de este modo, poder curar las últimas a la temperatura real de curado. En este caso, las probetas simulaban las condiciones de los bloques de arrancamiento, que tenían unas dimensiones suficientemente grandes y un espesor igual al de la torre de diseño.



Figura 28. Bañera para curado de probetas.

El resto de las probetas cúbicas fueron curadas en cámara de humedad, donde las condiciones de curado eran las siguientes:

- Temperatura: $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Humedad: $95 \pm 5\%$.

Por último, los bloques destinados a la obtención de la fuerza de arrancamiento de los anclajes fueron curados a la intemperie, siendo las condiciones de curado las siguientes:

- Temperatura: La temperatura del día en que se fabricaron los bloques varió entre $10,1^{\circ}\text{C}$ y $15,1^{\circ}\text{C}$, siendo la temperatura media de $12,8^{\circ}\text{C}$.
- Humedad: La humedad de ese día osciló entre $82,12\%$ y $86,94\%$.

2.4.3. Determinación de la consistencia

La determinación de la consistencia del hormigón se obtuvo siguiendo lo establecido en la norma UNE-EN 12350-2: “Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento” (48), conocido como ensayo del cono de Abrams (Figura 29).

Para la realización del ensayo fue necesario un molde troncocónico que se emplazará sobre una chapa metálica. En el desarrollo del ensayo participaron dos personas, una de ellas se encargó de asegurar que el molde se encuentre el contacto constante con la chapa (Figura 29), mientras que la otra relleno el molde con el hormigón. El llenado del molde se realizó en tres partes. Después de cada vertido, la persona encargada de mantener fijo el molde, compactó la mezcla utilizando una barra de compactación, mediante 25 golpes repartidos a lo largo de toda la superficie, penetrando desde la superficie hasta el fondo de la capa.

Después de la compactación del último vertido, se enrasó superficie. A continuación, se limpió cuidadosamente la chapa sobre la que se apoya el molde, asegurando que estaba húmeda para evitar la pérdida de humedad del hormigón en su contacto.

Por último, se procede a la retirada del molde verticalmente en un tiempo comprendido entre 2 y 5 segundos. Una vez retirado, se midió la pérdida de altura h , utilizando para ello el molde y la barra compactadora como referencia, midiendo la diferencia entre la altura del molde y el punto más alto del cono.



Figura 29. Desarrollo del ensayo del cono de Abrams.

La pérdida de altura del cono de hormigón está relacionada con la consistencia del mismo, cuanto menor sea la consistencia mayor será el asiento del hormigón. La consistencia deseada para cada proyecto depende los mecanismos de puesta en obra, así como de la presencia de encofrados, armaduras, etc.

2.5. Propiedades físicas del hormigón endurecido

Para la determinación de las propiedades físicas del hormigón endurecido, se analizaron 8 muestras prismáticas (Figura 30):



Figura 30. Muestras para análisis de propiedades físicas.

2.5.1. Determinación de la densidad

Para la obtención de las características físicas del hormigón en estado endurecido en lo relativo a densidad y porosidad, se tuvo en cuenta la norma UNE-EN 12390-7: "Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido" (49).

En primer lugar, hay se calculó el peso seco (P_s) de las probetas ensayadas. Para ello, las probetas se mantuvieron en horno a 105°C hasta peso constante.

Posteriormente, las probetas se introdujeron en vacío (Figura 31) durante 24 horas para extraer todo el aire que pueda quedar almacenado en los poros. Posteriormente se llenó con agua el recipiente para que, aprovechando la presión generada por el vacío, los poros se llenaran de agua. Transcurrido todo el proceso y una vez extraídas las muestras, se secaron superficialmente para obtener el peso saturado con superficie seca (P_{SSS}).



Figura 31. Tanque de vacío.

A partir de ahí, se obtuvo el volumen de poros accesibles (5) como la diferencia de peso saturado con superficie seca y el peso seco de las probetas:

$$h_a = P_{SSS} - P_s \quad (5)$$

Una vez pesadas las probetas, las probetas se sumergieron en agua para el cálculo del volumen aparente (6). Para ello se utilizó una balanza (Figura 32) en la que se sumergieron las probetas con la ayuda de un estribo. La balanza fue tarada con el recipiente y el estribo sumergidos antes de cada medición.



Figura 32. Medida del volumen aparente de las muestras.

Con estos datos, se pueden obtener la densidad aparente (7) y relativa (8) del hormigón:

$$V_r = V_a - h_a \tag{6}$$

$$d_a = \frac{P_s}{V_a} \tag{7}$$

$$d_r = \frac{P_s}{V_r} \tag{8}$$

2.5.2. Determinación de la porosidad accesible

La porosidad es una propiedad relacionada con la densidad aparente, por lo tanto, el objetivo será su minimización mediante técnicas de vibrado para así conseguir la maximización de la densidad.

La relación entre el volumen de poros accesibles y el volumen aparente de las probetas en tanto por ciento proporciona la porosidad accesible (9) del material.

$$\text{Porosidad (\% volumen)} = \frac{h_a}{V_a} \cdot 100 \tag{9}$$



2.5.3. Determinación del coeficiente de absorción

Conocida la porosidad accesible y el peso seco de las muestras, se calculó la absorción por medio de la siguiente expresión (10):

$$\text{Absorción (\% peso)} = \frac{h_a}{P_s} \cdot 100 \quad (10)$$

2.6. Propiedades mecánicas del hormigón endurecido

2.6.1. Determinación de la resistencia a compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión de uniaxial de probetas normalizadas de hormigón, se tuvo en cuenta lo establecido en la norma UNE-EN 12390-3:2009: “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas” (50).

Las probetas empleadas en el ensayo fueron probetas cúbicas de 15 cm de lado. Tras su elaboración, fueron almacenadas en una cámara a temperatura y humedad controladas hasta el momento de ensayo, concretamente, a los 7 y 28 días. Por otro lado, las ensayadas a 10 horas fueron curadas, como se ha comentado anteriormente, en agua.

Para llevar a cabo el ensayo, se utilizó una prensa hidráulica (Figura 33). Las probetas fueron cargadas linealmente hasta rotura, aplicándose una carga a una velocidad constante, de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta fuera de $0,5 \pm 0,2$ MPa/s.

La resistencia a compresión uniaxial de las probetas cúbicas se obtuvo mediante la siguiente expresión (11):

$$R_c = \frac{F}{S} = \frac{F}{L^2} \quad (11)$$

Siendo:

- F: Carga máxima resistida por la probeta, expresada en N.
- S: Superficie de aplicación de la carga, expresada en mm².
- D: Diámetro de la probeta, expresado en mm.
- R_c : Resistencia a compresión de la probeta, expresada en MPa.



Figura 33. Equipo empleado para el ensayo de resistencia a compresión.

2.6.2. Determinación de la resistencia a tracción por flexión

Para la obtención de la resistencia a tracción por flexión, se tuvo en cuenta la norma UNE-EN 14651: "Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a tracción por flexión" (51).

Para la realización del ensayo se utilizaron las probetas prismáticas anteriormente descritas. Antes del ensayo, las probetas fueron adaptadas mediante la realización de una entalla de 2,5 cm en el punto medio de la cara contraria a la de aplicación de la carga, mediante la utilización de una sierra circular con vía húmeda (Figura 34).



Figura 34. Realización de la entalla para ensayo de flexión.

El ensayo se basa en que el comportamiento a tracción del hormigón reforzado con fibras de acero está relacionado con la resistencia residual a tracción por flexión, determinada a partir de la curva carga-flecha, obtenida por la carga de las probetas.

Para la realización del ensayo (Figura 35), la probeta se colocó sobre dos rodillos con una distancia entre los mismos de 50 cm y un rodillo superior en el centro de la probeta, donde se aplicó la carga.

Para la determinación de la flecha se instaló un transductor (LVDT), que medía el desplazamiento de una placa metálica delgada fijada a media anchura de la probeta, a través de la entalla, a la vez que se medía la carga empleada. El ensayo se dio por terminado una vez que el desplazamiento vertical superó los 4 mm.



Figura 35. Ensayo a tracción por flexión.

Una vez obtenida la flecha, mediante la siguiente expresión (12), se obtiene el desplazamiento del borde de la fisura (CMOD):

$$\delta = 0,85 \cdot \text{CMOD} + 0,04 \quad (12)$$

A partir de ahí, se puede representar la fuerza del ensayo y el desplazamiento del borde de la fisura para obtener en nuestro caso F_3 , que se corresponde con un CMOD igual a 2,5.

Finalmente, una vez hallado este valor, se obtuvo la resistencia residual a tracción por flexión mediante la siguiente expresión (13):

$$f_{R3} = \frac{3 \cdot F_3 \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (13)$$

Siendo:

- f_{R3} : Resistencia residual a tracción por flexión (N/mm²).
- F_3 : Carga correspondiente a CMOD = 2,5 (N).
- l : Longitud del vano (mm).
- b : Anchura de la probeta (mm).
- h_{sp} : Distancia desde el fondo de la entalla a la parte superior de la probeta (mm).

2.7. Determinación de la fuerza de arrancamiento de anclajes

Para la determinación de la fuerza de arrancamiento de anclajes embebidos en hormigón reforzado con fibras de acero, se fabricaron unos bloques (Figura 36) de dimensiones 1,20x1,20x0,40 m. El propósito de estas dimensiones era simular las condiciones de las paredes de una torre eólica real, con espesor de 0,40 m.



Figura 36. Bloques para la determinación de la fuerza de arrancamiento.

El tipo de anclaje colocado en las piezas era similar a los presentes en los encofrados de las torres eólicas, de forma que se pudiera analizar su comportamiento frente al arrancamiento, con el objetivo de comprobar la seguridad del encofrado. Para ello se colocó una barra roscada en la zona del anclaje (Figura 37) a partir de la cual se aplicó el esfuerzo manualmente mediante la utilización de un gato hidráulico, registrándolo mediante una célula de carga (Figura 38).



Figura 37. Equipo utilizado para obtener la fuerza de arrancamiento.



Figura 38. Detalle de la célula de carga.

3. Resultados y análisis

3.1. Propiedades del cemento

3.1.1. Densidad

Una vez realizado el ensayo enunciado anteriormente, se obtiene una densidad de cemento de (14):

$$D_r = 3,12 \text{ g/cm}^3 \quad (14)$$

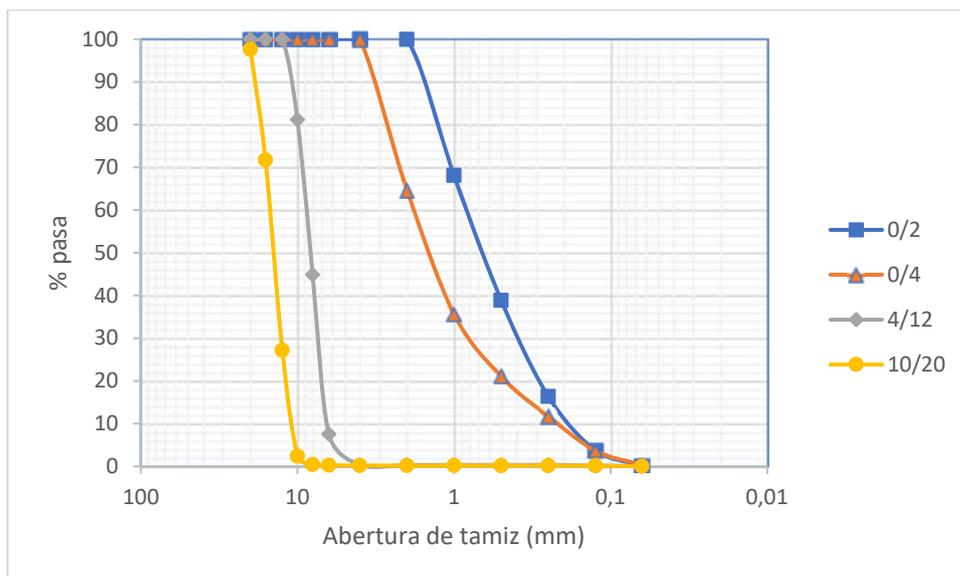
El cemento utilizado es del tipo CEM I 52,5N. Los cementos de tipo I deben tener un contenido mínimo de clínker de Portland de 95%. Este cemento ha de tener una resistencia mínima de 52,5 MPa a los 28 días y 20 MPa a los 7 días de edad. En cuanto al identificador N, indica que la resistencia inicial del cemento es normal.

3.2. Propiedades de los áridos

3.2.1. Granulometría

A continuación (Tabla 2), se muestran las distintas curvas granulométricas de las fracciones de árido empleadas:

Tabla 2. Granulometría de los áridos.



De las fracciones más gruesas 4/12 y 10/20 se obtienen distribuciones granulométricas pobremente graduadas, ya que la mayor parte del contenido de



árido pasa entre los tamices 7 y 20 mm. Por otra parte, las fracciones 0/2 y 0/4 presentan una buena graduación granulométrica.

Las granulometrías de las distintas fracciones cumplen con las condiciones granulométricas especificadas en la EHE-08, por lo tanto, son aptas para su aplicación en hormigones.

3.2.2. Densidad

En la siguiente tabla (Tabla 3) se muestran los resultados obtenidos para las diferentes fracciones de árido empleadas:

Tabla 3. Densidades de los áridos.

Fracción	Densidad relativa (g/cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)
0/2	2,64	2,68
0/4	2,64	2,68
4/12	2,67	2,70
10/20	2,67	2,70

Los resultados obtenidos en cuanto a la densidad de los áridos se corresponden con los datos suministrados por la cantera de procedencia.

3.2.3. Absorción

A continuación (Tabla 4), se muestra la absorción obtenida en los ensayos realizados a las distintas fracciones de áridos:

Tabla 4. Absorción de áridos.

Fracción	Absorción (%)
0/2	0,49
0/4	0,49
4/12	0,55
10/20	0,55

Los áridos son de buena calidad para su utilización como componentes de hormigón dada la baja absorción obtenida en los ensayos.

3.3. Propiedades del hormigón fresco

3.3.1. Consistencia

Como se muestra a continuación (Figura 39), el ensayo del cono de Abrams dio lugar a un asiento de 20 cm, lo cual se traduce en una consistencia fluida del hormigón.



Figura 39. Ensayo del cono de Abrams.

3.4. Propiedades físicas del hormigón endurecido

En la siguiente tabla (Tabla 5) se muestran las propiedades físicas del hormigón endurecido:

Tabla 5. Propiedades físicas del hormigón endurecido.

Muestra	Densidad relativa (g/cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)	Porosidad (% volumen)	Absorción (% peso)
1	2,45	2,35	4,13	1,76
2	2,46	2,35	4,39	1,87
3	2,44	2,33	4,47	1,92
4	2,46	2,35	4,21	1,79
5	2,44	2,34	4,11	1,75
6	2,43	2,33	4,23	1,81
7	2,45	2,35	4,26	1,81
8	2,45	2,34	4,38	1,87
Media	2,45	2,34	4,27	1,82

Los ensayos arrojan unos resultados coherentes en cuanto a las propiedades físicas. La densidad alta y la porosidad y absorción bajas son resultados esperables para hormigones de alta resistencia.

3.5. Propiedades mecánicas

3.5.1. Resistencia a compresión

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a compresión (Tabla 6) realizados sobre probetas cúbicas (Figura 40) a las edades de 10 horas, 7 días y 28 días respectivamente:

Tabla 6. Resistencia a compresión.

Muestra	Resistencia a compresión [MPa]		
	10 horas	7 días	28 días
Probeta 1	11,60	45,10	53,80
Probeta 2	12,70	46,60	51,28
Probeta 3	14,90	40,70	46,48
Media	13,00	44,13	50,52

En base a los resultados expresados en la tabla anterior se puede observar la evolución de la resistencia a compresión del hormigón. Siendo la resistencia característica la obtenida a los 28 días, a las 10 horas se alcanza el 25,73% de la misma y el 87,35% a los 7 días.



Figura 40. Probeta tras ensayo de resistencia a compresión.

3.5.2. Resistencia a tracción por flexión

Una vez realizado el ensayo (Figura 41), se procedió al tratamiento de los datos con las fórmulas descritas en la norma.



Figura 41. Probeta tras el ensayo a tracción por flexión.

La gráfica resultante del ensayo a tracción por flexión realizada a los 28 días de edad es la siguiente (Figura 42):

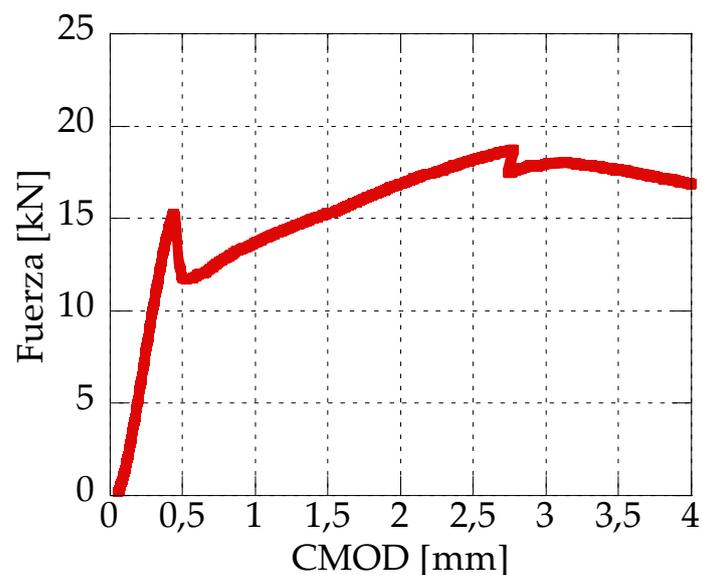


Figura 42. Gráfica Fuerza-CMOD.



Aplicando la fórmula, puede obtenerse la resistencia residual a la tracción por flexión, obteniendo un valor correspondiente al $CMOD_3=2,5$. De esta forma se obtiene:

$$F_{R,3} = 6,27 \text{ MPa}$$

3.6. Fuerza de arrancamiento de anclajes

En el caso de la fuerza de arrancamiento de anclajes, se ensayaron tres bloques a las 10 horas y únicamente uno a los 28 días para comprobar el modo de fallo del anclaje. A continuación (Tabla 7), se muestran la fuerza de arrancamiento y el modo de fallo de cada uno de los anclajes:

Tabla 7. Arrancamiento de anclajes.

Muestra	Fuerza de arrancamiento (kN)		Modo de fallo
	10h	28d	
Bloque 1	182	-	Rotura de la barra dywidag
Bloque 2	180,7	-	Fallo de la rosca del interior del anclaje
Bloque 3	185,4	-	Fallo de la rosca del interior del anclaje
Bloque 4	-	155,5	Fallo de la rosca del interior del anclaje

En las figuras Figura 43 y Figura 44 se muestra en detalle la rotura del anclaje 1. Se puede apreciar claramente la rotura de la barra dywidag del anclaje y el hueco resultante en el bloque, provocado por la forma de cono del anclaje.



Figura 43. Detalle del anclaje 1.



Figura 44. Detalle del bloque 1.

En el caso del segundo bloque, la rotura del anclaje fue diferente, ya que se produjo por el desgaste de la rosca del mismo. Sin embargo, y de igual manera que el caso anterior, en el bloque no se producen roturas del hormigón.



Figura 45. Detalle del anclaje 2.



Figura 46. Detalle del bloque 2.

De igual forma que el caso anterior, el tercer anclaje ensayado a arrancamiento falló por la rotura de la rosca de la barra dywidag. En el bloque de hormigón se puede observar la barra del anclaje tras la rotura.



Figura 47. Detalle del anclaje 3.



Figura 48. Detalle del bloque 3.

El último de los anclajes, ensayado a los 28 días, sirvió como confirmación de los resultados obtenidos a las 10 horas, ya que el modo de fallo también fue por fallo de la rosca de la barra.



Figura 49. Detalle del anclaje 4.



Figura 50. Detalle del bloque 4.



4. Conclusiones

Las propiedades físicas obtenidas en los ensayos son las esperadas. Densidad alta y porosidad y absorción bajas son resultados esperados para hormigones de alta resistencia. En el caso de la densidad, la incorporación de las fibras favorece este aumento.

Las propiedades mecánicas, tanto la resistencia a compresión, como la resistencia a tracción por flexión son las propias de un hormigón competente, dada la cantidad de cemento presente y la presencia de las fibras.

El comportamiento de los anclajes en este tipo de hormigones es el deseado, ya que se produce la rotura de los mismos y no la del hormigón, garantizando así, la seguridad de los encofrados trepantes durante la construcción de las torres eólicas.

5. Bibliografía

1. GWEC. Global wind energy council report 2018. Wind Global Council Energy [Internet]. 2019;(April):1–61. Available from: www.gwec.net
2. Lewin TJ. An investigation of design alternatives for 328-ft (100-m) tall wind turbine towers. 2010;192. Available from: <https://lib.dr.iastate.edu>
3. Singh AN. Concrete construction for wind energy towers. Indian Concrete Journal. 2007.
4. McKenna R, Ostman V.d. Leye P, Fichtner W. Key challenges and prospects for large wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016;53:1212–21.
5. Aplicación del hormigón con fibras a torres eólicas. Estado del arte y marco normativo. 2018;
6. Garrido Rodriguez M, Bartolome Alonso M, Arévalo Sarrate C, Charro Blanco L, Pascual del Valle JP. Sistemas de encofrado: análisis de soluciones técnicas y recomendaciones de buenas prácticas preventivas. 2011;
7. Barrio García N. El encofrado deslizante en la construcción de chimeneas industriales. Informes de la Construcción. 1985;36(368):25–7.
8. López A, Zerbino RL, Traversa LP. EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DEL HORMIGÓN VISTO EMPLEADO. 2009;(1).
9. Nistal Cordero Á, Ruiz Abrío M. El hormigón: Historia, antecedentes en obras y factores identificativos de su resistencia. Tecnología y desarrollo. 2012;(10):4.
10. Anaya Díaz J. Hormigón , estructura y forma de una nueva técnica en la arquitectura española de la primera mitad del siglo XX. Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. 2000;13–22.
11. Menéndez G, Bonavetti V, Irassar E. Los diseños de experimentos y la tecnología del hormigón. Revista de la Construcción. 2008;7(1):94–104.
12. Per Goltermann and Lars Palbøl VJ. Packing of Aggregates: An Alternative Tool to Determine the Optimal Aggregate Mix. ACI Materials Journal. 94(5).



13. Neville A. Cementitious Materials - A Different Viewpoint. *Concrete International*. 16(7).
14. Aitcin P-C. Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research* [Internet]. 2000 Sep 1 [cited 2020 Jan 25];30(9):1349–59. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884600003653>
15. AENOR. UNE-EN 12620: “Áridos para hormigón”. 2009.
16. AENOR. UNE-EN 933-2: “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1:Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices para ensayo, tamaño nominal de las aberturas”. 1996.
17. AENOR. UNE-EN 10080: “Acero para el armado de hormigón. Acero soldable para armadura de hormigón armado. Generalidades”. 2006.
18. AENOR. UNE 36094: “Alambres y cordones de acero para armaduras de hormigón pretensado”. 1997.
19. MASSICOTTE Bruno; BISCHOFF PHrP (Editor); CG (Editor) ; LC des P et CF (Organiser of meeting); EN des TP de l’Etat F (Organiser of meeting)Laboratoire C des P et CF (Organ. Fibre reinforced concrete: A structural perspective. 2000.
20. Fernández Cánovas M. Hormigones reforzados con fibras de acero. *Informes de la Construcción*. 1982;34(342):5–17.
21. AENOR. UNE-EN 14889-1: “Fibras para hormigón”.
22. Miravete A, Mieres JM, Calvo I, Comino P, Chiminelli A, Cuartero J, et al. Comportamiento de la fibra de vidrio AR para aplicaciones estructurales en la construcción. *Materiales de Construcción*. 2005;55(280):63–9.
23. Barreda M, Iaiani C, Sota JD. Hormigón reforzado con fibras de polipropileno: tramo experimental de un pavimento de hormigón. *Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga* [Internet]. 2000;1145–50. Available from: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/neuquen/Trabajos/1801.PDF>
24. Puertas F, Amat T, Vázquez T. Comportamiento de morteros de cementos alcalinos reforzados con fibras acrílicas y de polipropileno. *Materiales de Construcción*. 2000;2000(259):69–84.



25. Anon. Status Report on Fiber Reinforced Concretes. *Concrete Construction - World of Concrete*. 1976;21(1):13–6.
26. AENOR. UNE 83500-1: “Hormigones con fibras de acero y/o polipropileno. Clasificación y definiciones. Fibras de acero para el refuerzo de hormigones”. 2008.
27. AENOR. UNE 83504: “Hormigones con fibras. Fabricación y conservación de probetas para los ensayos de laboratorio”. 2004.
28. Serna Ros P. Método para la formulación de hormigones de fibras metálicas. *Materiales de Construcción*. 1984;34(194):17–23.
29. Almansa EM, Cánovas MF. Dosificación de hormigón reforzado con fibras de acero. *Materiales de Construcción*. 1997;1997(247–248):11–26.
30. EHE-08. Anejo 14. Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras. :505–25.
31. Mohammadi Y, Singh SP, Kaushik SK. Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials* [Internet]. 2008 May 1 [cited 2019 Oct 10];22(5):956–65. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061806003515?via%3Dihub>
32. Yazici S, Inan G, Tabak V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials*. 2007;21(6):1250–3.
33. Olivito RS, Zuccarello FA. An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete. *Composites Part B: Engineering* [Internet]. 2010 Apr 1 [cited 2019 Oct 10];41(3):246–55. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836809002194?via%3Dihub>
34. Samarakoon SMSMK, Ruben P, Wie Pedersen J, Evangelista L. Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste. *Case Studies in Construction Materials* [Internet]. 2019;11:e00259. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259>
35. Vicente MA, Ruiz G, González DC, Mínguez J, Tarifa M, Zhang X. Effects of fiber orientation and content on the static and fatigue behavior of SFRC by using CT-Scan technology. *International Journal of Fatigue* [Internet].



- 2019;128(March):105178. Available from:
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.038>
36. Sree Sandhya K, Rajamurugadoss J, Ganesh Prabhu G. Structural and other applications of steel fiber reinforced concrete – a review. *International Journal of Scientific and Technology Research*. 2019;8(10):2317–22.
 37. de la Fuente A, Pujadas P, Blanco A, Aguado A. Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings. *Tunnelling and Underground Space Technology* [Internet]. 2012;27(1):60–71. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2011.07.001>
 38. Achilleos C, Hadjimitsis D, Neocleous K, Pilakoutas K, Neophytou PO, Kallis S. Proportioning of steel fibre reinforced concrete mixes for pavement construction and their impact on environment and cost. *Sustainability*. 2011;3(7):965–83.
 39. Elsaigh WA, Kearsley EP, Robberts JM. Steel fibre reinforced concrete for road pavement applications. 24th Annual Southern African Transport Conference, SATC 2005: Transport Challenges for 2010. 2005;(July):191–201.
 40. Kohoutková A, Broukalová I. Structural Applications of Fibre Reinforced Concrete in the Czech Republic. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;246(1).
 41. Centre TC, Gifford. Concrete Towers for Onshore and Offshore Wind Farms: Conceptual Design Studies. 2007; Available from: http://www.concretecentre.com/online_services/publication_library/publication_details.aspx?PublicationId=634
 42. American Concrete Institute. ACI 355.1R-91 Informe sobre el Estado del Arte de los Anclajes en Hormigón (Reaprovado 1997). 1997;91.
 43. Nilforoush R, Nilsson M, Elfgren L. Experimental evaluation of tensile behaviour of single cast-in-place anchor bolts in plain and steel fibre-reinforced normal- and high-strength concrete. *Engineering Structures* [Internet]. 2017;147:195–206. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.05.062>
 44. Cook RA. BEHAVIOR OF CHEMICALLY BONDED ANCHORS By Ronald A. Cook, I Member, ASCE. 1994;119(9):2744–62.



45. Tóth M, Bokor B, Sharma A. Anchorage in steel fiber reinforced concrete – concept, experimental evidence and design recommendations for concrete cone and concrete edge breakout failure modes. *Engineering Structures* [Internet]. 2019;181(June 2018):60–75. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.007>
46. AENOR. UNE 80103: “Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación de la densidad real”. 2013.
47. AENOR. UNE-EN 933-1: “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado”. 2012.
48. AENOR. UNE-EN 12350-2: “Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento”. 2009.
49. AENOR. UNE-EN 12390-7: “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido”. 2009.
50. AENOR. UNE-EN 12390-3: “Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas”. 2009.
51. AENOR. UNE-EN 14651: “Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a tracción por flexión”. 2007.
52. Mármol PC. Hormigones con Fibras de Acero. 2010; Available from: http://oa.upm.es/4510/1/TESIS_MASTER_PATRICIA_CRISTINA_MARMOL_SALAZAR.pdf