

CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES HORMIGÓN ALTA DENSIDAD

3.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha visto en el capítulo anterior, la necesidad de generar energías no contaminantes es inminente, es por ese motivo que el proyecto de generación de energía de las olas adquiere una gran relevancia y para llevar a cabo este proyecto es necesaria la utilización de un hormigón de alta densidad. Es por ese motivo que el presente capítulo nos introduciremos en el tema del hormigón de alta densidad, en una primera parte se mostrara la evolución histórica del hormigón, hasta llegar al hormigón actual y se justifica la necesidad del uso de un hormigón de alta densidad. En una segunda parte hablaremos del hormigón de alta densidad, se señalaran los materiales utilizados en su fabricación y sus características, también se mostraran los distintos áridos que son ocupados para este tipo de hormigones especiales. Finalmente hablaremos del hormigón de alta densidad y de los diferentes usos que se le ha dado hasta el momento, de su importancia en la protección radiológica y otros.

El objetivo de este capítulo es mostrar la situación histórica y actual del hormigón de alta densidad, sus orígenes y características, nos ayudan a tener una visión clara de sus cualidades y usos especiales.

Para lograr este objetivo, se consulta información bibliográfica del tema, debido a la escases de esta información se consultan también empresas que produzcan áridos pesados o trabajen con estos y las obras involucradas. Se procede a investigar los

distintos áridos que son posibles utilizarlos en la fabricación del hormigón, debido a su alta densidad y se comentan sus principales características. Finalmente, se dan a conocer algunos proyectos que utilizan este tipo de hormigón con sus respectivas densidades.

3.2 EL HORMIGÓN

Según la definición de la Real Academia Española, el hormigón es una mezcla compuesta de piedras menudas y mortero de cemento y arena [Real Academia Española (2001)]. Pero el hormigón es mucho más que eso. El hormigón se refiere a la mezcla de mortero y agregado grueso. Algunos países de habla hispana lo denominan también concreto. [FIHP (2008)]

El mortero se refiere a la mezcla de pasta y agregado fino (arena), la cual es utilizada en la nivelación de pisos, en la estabilización de taludes y especialmente en la construcción de mampostería, en donde se usa como pega de ladrillos o como recubrimiento de muros, caso en el cual se le conoce como pañete, repello o revoque. [FIHP (2008)]

El término pasta se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire (naturalmente atrapado o intencionalmente incorporado) y aditivos (cuando son empleados). Cuando el hormigón se encuentra en estado plástico, la pasta actúa como lubricante de los agregados, comunicando fluidez a la mezcla, lo cual permite que la colocación y compactación sean adecuadas.

Cuando la mezcla se encuentra en estado endurecido, la pasta de cemento al aglutinarse, obtura los espacios que hay entre las partículas y reduce la permeabilidad del hormigón, evitando el desplazamiento de agua dentro de la masa endurecida. Este efecto es importante, en estructuras que estén expuestas a la acción de aguas agresivas, las cuales eventualmente pueden deteriorar la masa, haciéndole perder resistencia. Adicionalmente, la pasta fraguada y endurecida en unión de los agregados, contribuye a suministrar la resistencia mecánica característica a la compresión, lo cual depende la llamada interfase agregado pasta, o agregado matriz. [FIHP (2008)]

El hormigón, se produce a partir de un diseño de mezcla que consiste en la selección de los constituyentes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y su dosificación en cantidades relativas para producir, tan óptimamente como sea posible, una masa volumétrica con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, masa unitaria, estabilidad de volumen y apariencia adecuadas. Las propiedades requeridas del hormigón fresco están gobernadas por el tipo de construcción y por las técnicas de colocación y de transporte y, las propiedades del hormigón endurecido están especificadas por el diseñador de la estructura. En general, cada tipo de construcción tiene requerimientos particulares que dependen de las condiciones climáticas, del sistema constructivo, del tiempo y de los costos de ejecución. [FIHP (2008)]

Probablemente el empleo de materiales cementantes se remonta al inicio de la civilización cuando se utiliza la arcilla o una mezcla de cal y arena para unir las piedras. No hay forma de determinar la primera vez que se utilizó un material aglomerante, sin

embargo, hay vestigios que indican que la obra de hormigón más antigua fue construida alrededor de los años 5600 A.C. en las riberas del río Danubio en Yugoslavia. Después de esta aplicación no se tiene noticia de la utilización hasta el año 2650 A.C. cuando los egipcios construyeron las pirámides de Gizeh. Posteriormente, en el año 500 A.C los antiguos griegos mezclaron compuestos basados en caliza calcinada (cal viva) y agua a la cual se adicionaba arena, para recubrir y unir piedras y ladrillos no cocidos. La adición a estas mezclas, de piedra triturada, tejas rotas o ladrillo, dieron origen al primer hormigón.

Seguramente, la civilización romana copió la idea de los griegos, ya que se han encontrado obras de hormigón romanas anteriores al año 300 A.C. Con la caída del imperio romano declinó el uso del hormigón y muchos de los conocimientos desarrollados desaparecieron completamente. La técnica comenzó a ser recobrada en Inglaterra y se tienen evidencias que hacia el año 700 D.C. Durante la edad media y el renacimiento el hormigón fue poco empleado. Después del siglo XII, mejoró la calidad y de nuevo se utilizó gracias a una perfecta calcinación de la cal y al uso de algún material similar en propiedades a las tobas volcánicas.

En Latinoamérica, hay muestras de desarrollo de materiales cementantes y estructuras imponentes como las ciudades construidas por los mayas y los aztecas en México o las construcciones de Machu Pichu en el Perú, entre otras.

Durante los siglos posteriores, los avances fueron escasos hasta el punto de que solo llegó a producirse un mortero débil hecho únicamente de cal y arena. A principios de la edad moderna se presentó una disminución general en la calidad y la crisis llegó al punto, de acabar con la fabricación y el uso del cemento. En 1811, Dabbs obtuvo una patente para producirlo empleando arcilla y polvo de los caminos. Posteriormente el 21 de octubre de 1824 Joseph Aspdin un constructor de Leeds (Inglaterra), calcinó en un horno una mezcla de tres partes de piedra caliza por una de arcilla, la cual molió y pulverizó y consiguió la patente para producir el primer cemento Portland. La primera fábrica de cemento se instaló en Wakefield y funcionó entre 1826 y 1828. [FIHP (2008)]

El proceso de producción de cemento fue mejorado por Isaac Johnson en 1845 cuando fabricó este producto quemando una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del clínker, el cual después fue pulverizado obteniendo un compuesto fuertemente cementante. Johnson encontró que la temperatura de calcinación debía elevarse hasta el máximo.

Únicamente hasta el año 1900 aproximadamente, empezó el crecimiento notable de la industria del cemento, debido fundamentalmente a dos factores: en primer lugar, los experimentos realizados por los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y por el alemán Michaélis, con los cuales se logró producir cemento de calidad uniforme, que pudiera ser usado en la industria de la construcción. En segundo lugar, dos invenciones mecánicas muy importantes se hicieron al principio del siglo: los hornos rotatorios para la calcinación y el molino tubular para la molienda. Con estas dos máquinas, pudo producirse el cemento Portland en cantidades comerciales. A partir de ese momento, se desarrolla el rápido crecimiento de esta industria, que hoy produce un material de construcción imprescindible, dentro del actual sistema de vida. [FIHP (2008)]

Un invento relativamente reciente, sucedido en 1903 en la ciudad de Hamburgo, Alemania, revolucionó el desarrollo de la industria del hormigón y de la construcción, cuando el Ing. Juergen Hinrich Magens, hizo transportar el primer metro cúbico de hormigón, producido en una planta mezcladora estacionaria, en un vehículo especial tirado por caballos hacia una obra distante 11 Km, el producto se llamó hormigón transportado. La idea de transportar una mezcla de agregados, pegante y agua, en estado fresco hacia una obra, fue planteada por el Ingeniero Inglés Deacon, quien vislumbró las ventajas que ello traería; pero los alemanes convirtieron la idea en un hecho. [Schmitt, Heinrich y Heene, Andreas (2004)]

Hoy día el hormigón es un material de la mayor versatilidad, que puede adaptarse, eligiendo el tipo y la composición de la mezcla, a las más diversas exigencias. Como lo son los hormigones ligeros, autocompactantes, de alta resistencia, etc. Y por supuesto el hormigón de alta densidad objetivo del presente trabajo. La industria del hormigón está inmersa en un proceso de modernización, actualmente son relevantes, las marcas, certificaciones de calidad, así como de preservar el medio ambiente y prevención de riesgos laborales.

Los hormigones se pueden clasificar según las diferentes densidades que posean, es decir, ligeros, normales y pesados. A continuación se especifican cada una de estas clasificaciones. [Schmitt, Heinrich y Heene, Andreas (2004)]

- Hormigón ligero, con una densidad de 2 t/m^3 como máximo. Además de áridos ligeros como la piedra pómez, las arcillas expandidas y las escorias, también se emplean granulados productores de poros o materiales espumantes.
- Hormigón normal con una densidad de más de 2 t/m^3 a $2,8 \text{ t/m}^3$ como máximo con arena y grava como áridos. En todos los casos que no son posibles confusiones con el hormigón ligero o el hormigón pesado se hablará sólo de hormigón.
- Hormigón de alta densidad o pesado, con una densidad bruta superior a $2,8 \text{ t/m}^3$. Los áridos se componen de espato pesado, magnetita o fragmento de chatarra.

También existen los hormigones especiales que se han desarrollado en los últimos años que además de tener características de densidad como los ligeros o normales, también poseen otras cualidades relevantes como lo son la alta resistencia, el color, autocompactantes, etc.

Las propiedades que debe tener un hormigón fresco es ser homogéneo y trabajable, lo que definirá en gran medida, las características del elemento obtenido. Para que el hormigón sea homogéneo, el material debe ser totalmente uniforme, es decir debe tener las mismas propiedades en cualquier punto de su masa. También es necesario que sea trabajable. Las propiedades que facilitan que un hormigón sea trabajable son las siguientes:

- Docilidad, facilidad que tiene un hormigón de adaptarse a un molde. Define la trabajabilidad del hormigón, es decir, la facilidad con que se puede llenar un encofrado, así como la posibilidad de hacer que el hormigón recubra perfectamente las armaduras.

- Cohesión, es decir la resistencia que opone un hormigón a segregarse, a la separación de sus componentes. La falta de cohesión comporta la separación de los áridos por un lado y de la lechada de cemento por otro.
- Consistencia, en el hormigón fresco es la propiedad que opone resistencia a la deformación y es determinada por el ensayo del Cono de Abrams.

Así pues para obtener un buen hormigón es necesario que sea dócil, es decir que se pueda transportar y colocar con facilidad, que sea homogéneo, y que tenga una cohesión y una consistencia adecuadas.

Actualmente el desarrollo, fabricación y aplicación del hormigón se rige según normas y códigos. En España, la EHE, Instrucción de Hormigón Estructural, es la norma validada.

3.3 HORMIGÓN ALTA DENSIDAD

El hormigón de alta densidad se define convencionalmente como aquellos hormigones con densidad superior a 3.000 Kg/m^3 . En su confección se emplean minerales pesados o desechos metálicos, alcanzándose densidades entre 4.000 y 4.800 Kg/m^3 . También se mezclan áridos pesados con áridos normales bajando los costos y la densidad, pero aumentando la tendencia a la segregación. Las resistencias de estos hormigones son algo superiores a las de hormigones tradicionales de igual razón agua cemento. El mayor peso también es una exigencia adicional a la mezcladora y los moldajes y aumenta las dificultades en el transporte, colocación y compactación. [Grupo Polpaico (2005)]

El hormigón de alta densidad no es un material nuevo, se ha empleado durante muchos años como contrapeso en puentes levadizos. Su aplicación en la industria de la construcción comienza en los años 60 y coincide con el desarrollo de la energía nuclear, ya que sus propiedades son de utilidad como material de protección contra la radiación. Hoy se utiliza como protección biológica de personas y material frente a los rayos X y rayos gamma en radiografía industrial y en instalaciones de terapia médica, así como en aceleradores de partículas y reactores nucleares. [UCN (2008)]

El hormigón, tanto tradicional como pesado, es un material muy adecuado para las instalaciones de protección debido a sus buenas propiedades de absorción, frenado de neutrones rápidos, carácter formáceo y relativo bajo costo en comparación con otros materiales de protección.[UCN (2008)]

Las propiedades del hormigón de gran peso, sea este en estado fresco o endurecido, se pueden adecuar para satisfacer las condiciones de la obra y los requisitos por medio de una selección apropiada de los materiales y de las proporciones de la mezcla. A excepción de la densidad, las propiedades físicas del hormigón de gran peso son similares a las del hormigón normal.

La resistencia es función de la relación agua/cemento; por lo tanto, para cualquier conjunto de materiales en particular, se pueden lograr resistencias comparables a las de los hormigones de peso normal. Es importante destacar que la resistencia de los

hormigones pesados queda condicionada por la naturaleza de los áridos, no estando en relación estricta con su mayor densidad. Existe sin embargo, consenso entre los investigadores de la especialidad que, a igualdad de razón agua/cemento dan resistencias algo superiores a las obtenidas por los hormigones convencionales. [UCN (2008)]

Las características de este hormigón deben permitir:

- La masa del hormigón fresco debe de ser trabajable.
- El hormigón endurecido debe poseer la resistencia y durabilidad deseada.
- El costo del producto resultante debe ser el mínimo compatible con calidad deseada.
- Los requisitos para obtener el hormigón adecuado son:
 - Usar materiales de calidad.
 - Proporcionar y dosificar adecuadamente dichos materiales.
 - Mezclar, transportar y colocar adecuadamente el concreto (para evitar segregación y lograr una buena compactación).
 - Mantener las condiciones de curado adecuadas (para que la hidratación del cemento sea lo más completa posible).

Los hormigones de alta densidad generalmente suelen usarse cuando el volumen del elemento en construcción es limitado. De esta forma con un hormigón más denso, conseguimos reducir los espesores necesarios. Necesitamos que este hormigón además de la densidad desarrolle también propiedades importantes como: alta resistencia mecánica (a compresión, impacto, abrasión, tracción, etc.) en caso de ser necesario, como por ejemplos en muros de protección biológica; afectación a grandes variaciones de temperatura, capacidad de retención de agua, conductividad térmica, calor específico y coeficiente de expansión lineal.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la pureza y consistencia. Las propiedades y composiciones de los diferentes componentes del hormigón deben ser lo más homogéneas posibles. Por ejemplo, la mayoría de las menas de hierro y bario tienen una gran cantidad de polvo, sílice y otras impurezas que disminuyen la densidad y otras propiedades importantes del hormigón de alta densidad, por lo que su utilización requiere un lavado previo y optimización para su utilización. También es importante considerar que el machaqueo de muchas de las menas citadas anteriormente produce una gran cantidad de fragmentos escamosos, alargados y generalmente frágiles. Estos fragmentos, no son deseables en la fabricación de un hormigón denso de buenas prestaciones. Por lo tanto, y a medida de lo posible, se deben elegir materiales cuyo machaqueo permita una buena clasificación de las granulometrías y no produzca cantidades excesivas de polvo. [Álvarez, Manel (2007)]

Como ya hemos visto antes el principal uso del hormigón actualmente es como protección biológica. Por este motivo, las dosificaciones más estudiadas y quizás más extendidas de hormigones de alta densidad tienen que ser modificadas en algún aspecto, ya que para hormigones estructurales lo lógico es hablar de cantidades de cemento entre

280 y 480 Kg/m³ y una relación de agua cemento de 0,5 aproximadamente. [Álvarez, Manel (2007)]

Durante los años 70, debido a las muchas construcciones de centrales nucleares, se hicieron unos importantes estudios en el laboratorio de materiales y estructuras de la Universidad de Berkeley. El objeto de estas investigaciones era el de proporcionar datos pertinentes de las constantes de los hormigones (resistencia a la compresión, módulos de elasticidad y Poisson, etc.) y para ello se confeccionaron probetas cilíndricas de 15x30 cm. Se ensayaron dos hormigones convencionales y dos de alta densidad. Las conclusiones principales que se extrajeron fueron las siguientes: [Álvarez, Manel (2007)]

1. Bajo condiciones dinámicas la resistencia a la compresión se incrementa alrededor de un 20-25% al pasar de hormigones convencionales a hormigones de alta densidad, El modulo de elasticidad y de Poisson también crecen un orden de un 5-8% y de 10-15% respectivamente.
2. El módulo de elasticidad se asemeja al módulo calculado con la ecuación de la ACI.
3. El uso de puzolana como aditivo en agregados de peso normal tiende a retardar la hidratación y a un substancial aumento de la resistencia a la compresión entre los 28 y 90 días después de elaborado.
4. Los hormigones de alta densidad estudiados (en este caso uno con magnetita y otro con perdigones de acero), presentan valores elevados de la resistencia a la compresión y del modulo de elasticidad.

Se presenta a continuación los diferentes componentes del hormigón con sus propiedades y características más relevantes y las normas correspondientes para cada uno de ellos.

3.3.1 Áridos

La obtención del hormigón de alta densidad queda condicionada al empleo de áridos según su peso específico, para lo cual se utilizan normalmente rocas mineralizadas o bien, aunque con menor frecuencia, se recurre a áridos sintéticos y de desechos metálicos. De las rocas mineralizadas, las variedades más usadas provienen de los minerales de hierro, tales como la magnetita, la ilmenita y la hematita, los cuales son sometidos a un proceso de chancado y selección, obteniéndose áridos cuyos pesos específicos oscilan entre 4,2 y 4,8 Kg/dm³. Se utilizan también dentro de este tipo de áridos los provenientes de la barita, que proporciona áridos con pesos específicos comprendidos entre 4,0 y 4,4 Kg/dm³.

Los áridos sintéticos también se utilizan en la fabricación de este hormigón de alta densidad. El ferrofósforo (Fe₃ P, Fe₂ P, FeP), que es un subproducto de la producción del fósforo, se ocupa para la fabricación de hormigones de alta densidad. Sus densidades varían entre 5,7 y 6,3 Kg/dm³ y se ha empleado mucho como árido grueso y fino en protecciones. Otro árido sintético son las escorias pesadas que tienen una densidad del orden de 5 Kg/dm³.

Los elaborados a partir de desechos metálicos se obtienen a partir de trozos de barras de acero redondo, recortes de planchas de acero o granalla. Su peso específico es similar al del hierro, es decir 7,5 a 7,8 Kg/dm³. Estos deben cumplir en líneas generales las mismas condiciones estipuladas para los áridos convencionales. Sin embargo, para su empleo debe tenerse en consideración que los áridos provenientes de minerales de fierro son muy fracturables debido a su construcción interna, por lo que están expuestos a variaciones de sus características durante su uso en obra, en especial de su granulometría y contenido de finos. Los áridos obtenidos de desechos metálicos presentan también algunas características de heterogeneidad, provenientes principalmente del estado de su superficie, la cual debe presentar algún grado de oxidación incipiente para favorecer la adherencia. [UCN (2008)]

Para hormigones de gran peso se debe utilizar áridos que tienen alta densidad, de los casi sesenta y cinco minerales que tienen densidades superiores a 3.500 (Kg/m³) en el campo de la construcción solo algunos son utilizados como árido para el hormigón, la razón por la cual no son utilizados todos los minerales es por cuestiones económicas. Los áridos tradicionales, aunque económicos tienen el inconveniente de obtener hormigones no mayores de 2.400 (Kg/m³). Los áridos naturales más usados son los que se presentan a continuación en la tabla 3.1, con sus características de color, densidad, dureza y otras.

Nombre	Color	Densidad Kg/dm ³	Dureza	Otros	Imagen
Barita Ba[SO ₄]	Incolora, blanca, amarilla, miel, azul, etc.	4,4	3,0-3,5	-Abundante en la naturaleza. - Se emplea en forma de polvo, arena y gravilla, diámetro hasta 30 mm. - Frágil	
Magnetita Fe ₃ O ₄	Negro	5,2	5,5	- Árido mas empleado junto con la barita - Frágil - Magnética -Abundante en España	
Limonita FeOOH·nH ₂ O	Pardo, amarillo, gris, negro	3,6 - 3,7	5,0-5,5	-Se utiliza en la obtención de Fe y subproductos como abono y fertilizante -Abundante en España	
Ilmenita FeTiO ₃	Negro	4,7	5,0-6,0	-Es la principal mena de Titanio -En España está presente en varias localidades	
Hematites Fe ₂ O ₃	Negro, gris acero, pardo, rojizo, rojo	5,2 - 5,3	5,5-6,5	-Prácticamente no magnético - En España es muy abundante	

Tabla 3.1.- Distintos minerales utilizados para la fabricación de hormigón de alta densidad. [Bauer, Joroslav (1981) y Mollfulleda, Joaquín (1996)]

Como observamos en la tabla 3.1 las mayores densidades que poseen estos áridos son de 5,3 Kg/dm³, y corresponden a los hematites, que además de encontrarse abundantemente en España es un material no magnético. Los áridos más importantes en el sector del hormigón de hormigón de alta densidad son la barita y la magnetita, ya que su obtención es más accesible. Cuando se utiliza la barita hablamos de hormigón barítico.

3.3.2 Cemento

Para hormigón en masa que es el requerido en el proyecto Oceantec del presente trabajo, se puede ocupar cementos comunes y especiales. La utilización permitida a los cementos comunes, para cada tipo de hormigón, se debe considerar extendida a los cementos blancos UNE 80305:96 y a los cementos con características adicionales (de resistencia a sulfatos y/o al agua de mar y de bajo calor de hidratación), UNE 80 303:96 correspondientes al mismo tipo y clase resistente que aquéllos. En general los hormigones de alta densidad no deben llevar cementos especiales y deben estar sujetos a las consideraciones de la Norma UNE 80301:96.

Hay que considerar que si los áridos poseen componentes que puedan reaccionar con los álcalis, deben utilizarse cementos con bajo contenido de éstos. Para la construcción de hormigón en masa, será preciso utilizar cementos de bajo calor de hidratación, UNE 80306:96. A menos que se controle la temperatura del hormigón, no se recomienda utilizar cementos de tipo III ni aceleradores, ya que esto comportaría tener un alto calor de hidratación que conllevaría a aumentar la fisuración. Los componentes puzolánicos o mixtos cemento-puzolana tienden a reducir la densidad del hormigón, por este motivo, no está recomendado su uso a no ser que la reducción de la densidad no suponga quedarse por debajo de los límites especificados.

Por lo general se utilizan cementos comunes portland tipo CEM I y CEM II. El cemento portland o portland normal está constituido por un 95 a 100% de clínquer. También puede estar formado hasta un 5% por otros componentes (escoria, puzolana, ceniza volante y caliza) como los componentes adicionales, aparte del regulador de fraguado y de algún posible aditivo.

Los CEM I se utilizan en hormigones en masa, armados o pretensados de alta o muy alta resistencia y en la elaboración de elementos prefabricados. Pero se debe tener la precaución de no utilizarlos en macizos de gran volumen con dosificaciones altas o en piezas susceptibles de fisurarse por retracción.

El cemento portland CEM II, es un tipo de cemento portland con adiciones. Con esta denominación se incluye los siguientes subtipos:

- Cemento Portland con Escoria (CEM II/A-S) y (CEM II/B-S).
- Cemento Portland con humo de sílice (CEM II/A-D).
- Cemento Portland con puzolana (CEM II/A-P) y (CEM II/B-P).
- Cemento Portland con ceniza volante (CEM II/A-V) y (CEM II/B- V).
- Cemento Portland con caliza (CEM II/A-L).

- Cemento Portland mixto (CEM II/A-M) y (CEM II/B-M).

Cada uno lleva unas proporciones variables de clínquer y de los otros componentes. En general los Cemento Portland con adiciones es un tipo de cemento muy utilizado en la elaboración de morteros y hormigones.

3.3.3 Agua

El agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente dañino en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras, en caso de un hormigón armado, frente a la corrosión, se recomienda el uso de agua potable. En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica y se debe cumplir con lo especificado en el artículo 27 de la EHE. Seguir Normas UNE 7234:71, UNE 7130:58, UNE 7131:58, UNE 7178:60, UNE 7132:58 y UNE 7235:71. [Editorial Moll (2005)]

Salvo estudios especiales se prohíbe expresamente el empleo de aguas de mar o salinas para el amasado o curado del hormigón armado o pretensado. La mayor parte de las aguas potables son admisibles para confeccionar los distintos aglomerados, tanto para su procedo de amasado como para su posterior curado. No obstante, en general, es más perjudicial el uso de aguas no adecuadas en el momento de hacer el curado de un hormigón que en el del propio amasado.

No debe ocuparse las aguas que contienen yeso (ya sea por contactos con terrenos selenitosos o a causa de yesos procedentes de derribo) porque pueden producir corrosión. También debe evitarse la utilización de aguas sulfatadas y en especial las procedentes de alcantarilla porque pueden deteriorar el hormigón, si no se utilizan cementos especiales. Tampoco se recomienda el uso de aguas de lluvia que son demasiado ácidas, ni aguas estancadas que suelen llevar materias orgánicas que resulten perjudiciales.

3.3.4 Aditivos

Son aquellas sustancias que incorporadas al hormigón antes del amasado o durante el mismo, proporcionan algunas modificaciones deseadas, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, propiedades habituales o comportamientos.

Además de los reductores de agua, existen otro tipo de aditivos para mejorar o modificar otras características del hormigón o mortero, como la densidad, el tiempo de fraguado, la impermeabilidad, resistencia a las heladas, etc.

Según la norma UNE.EN 934-2, los aditivos para hormigón son productos incorporados en el momento del amasado del hormigón en una cantidad no mayor del 5% en masa, con relación al contenido del cemento en el hormigón, con objeto de modificar las propiedades de la mezcla en estado fresco y/o endurecido.

Los diferentes tipos de aditivos se señalan a continuación junto con sus propiedades y características más importantes. [ANFAH (2005)]

a) Fluidificantes

Los fluidificantes, comúnmente llamados reductores de agua, son aditivos que, por sus características, pueden producir las siguientes funciones:

- Aumentar la trabajabilidad para un mismo contenido de agua sin producir segregación.
- Disminuir el contenido de agua para la misma trabajabilidad.

El uso combinado de las dos funciones anteriores nos permite adaptarnos a cada circunstancia y conseguir una mejora de las características del hormigón. Las dosificaciones habituales son del orden del 0,2% - 0,4% del peso del cemento (0,2 - 0,4 Kg de aditivo por cada 100 Kg de cemento).

b) Superfluidificantes

Los superfluidificantes, también conocidos como reductores de agua de alto rango, son aditivos que, por sus características pueden ser utilizados de dos maneras:

- Aumentar significativamente la trabajabilidad para un mismo contenido de agua sin producir segregación.
- Disminuir significativamente el contenido de agua para la misma trabajabilidad.

El uso combinado de las dos funciones anteriores nos permite adaptarnos a cada circunstancia y conseguir una mejora de las características del hormigón y de su puesta en obra. Las dosificaciones habituales son del orden del 0,8% - 1,5% del peso del cemento. Los efectos producidos por estos aditivos son más enérgicos que los correspondientes a los reductores de agua (fluidificantes).

c) Acelerantes de Fraguado

Los acelerantes del fraguado son aditivos cuya función principal es reducir o adelantar el tiempo de fraguado del cemento. La temperatura de la mezcla puede influir en la eficacia de los aditivos. Las dosificaciones habituales son muy variables y se recomienda consultar al fabricante. Las aplicaciones principales de estos aditivos son:

- Hormigonado en tiempo frío.
- Puesta en servicio rápida.

d) Aditivos Retardantes

Los aditivos retardantes son aquellos que producen un cierto retraso en el tiempo de fraguado del cemento. Los aditivos retardantes se usan cuando se precisa controlar el

fraguado de los hormigones en condiciones de puesta en obra difíciles debido a diversas causas como pueden ser las siguientes:

- Hormigonado en tiempo caluroso.
- Largos desplazamientos.
- Estructuras sin discontinuidades.

Para la dosificación de los aditivos retardantes se deberán seguir las instrucciones facilitadas por el fabricante respecto al modo y porcentaje a aplicar. La sobredosificación accidental de un aditivo retardante conllevará un retraso de fraguado más acusado cuanto mayor sea la misma, con resistencia iniciales bajas.

e) Aditivos aireantes

Los aditivos aireantes son aquellos que producen un aumento del aire ocluido en el hormigón fresco y endurecido. El aire introducido en el hormigón por la agitación del amasado, se desarrolla y estabiliza por efecto del aditivo aireante formando un sistema de burbujas semi-microscópico que se distribuye uniformemente en la fracción de la pasta de la masa. El uso de aditivos aireantes en los hormigones produce un efecto mejorador de la trabajabilidad y de la durabilidad.

Las aplicaciones más importantes son:

- Hormigones semi-secos.
- Hormigones con bajo contenido en finos.
- Hormigones resistentes a los ciclos de hielo y deshielo.

Para la dosificación de los aditivos aireantes se deberán seguir las instrucciones facilitadas por el fabricante respecto al modo y al porcentaje a aplicar. Dado que la inclusión de aire en la masa del hormigón mejora su plasticidad, se recomienda ajustar el contenido de agua disminuyéndolo, lo que normalmente compensa la pérdida de resistencia que habitualmente se produce. La sobredosificación accidental de un aditivo aireante conllevará un aumento anormal del aire ocluido que ocasionará una mayor plasticidad y una pérdida de resistencia a todas las edades.

f) Aditivos Anticongelantes

Los aditivos anticongelantes son aquellos que disminuyen el punto de congelación del agua del hormigón. Se aplican en hormigonado con bajas temperaturas.

Los aditivos anticongelantes se deberán añadir en los porcentajes recomendados por cada fabricante, además el uso de estos productos no excluye la aplicación de otras medidas de protección contra el frío de las estructuras hormigonadas, de acuerdo con las recomendaciones y requisitos de la EHE en sus artículos sobre hormigonado en tiempo frío.

g) Aditivos de bombeo

Los aditivos de bombeo son productos que mejoran el transporte mediante bomba del hormigón, aumentando su cohesión y evitando la segregación de sus componentes, al mismo tiempo lubrican la masa facilitando su tránsito por las conducciones. Los aditivos de bombeo se deberán añadir en las condiciones y porcentajes recomendados por cada fabricante.

3.4 APLICACIONES DEL HORMIGÓN DE ALTA DENSIDAD

El hormigón pesado se ha utilizado generalmente para blindar estructuras y proteger frente a la radiación, en centrales nucleares, salas de radiología de hospitales, aceleradores de partículas, etc. Su principal uso ha sido de escudo protector contra las radiaciones. La capacitación de estas radiaciones depende del tipo de emisión que se trate, pudiendo indicarse que las ondas de corta longitud (rayos x, rayos gama) se necesitan la interposición de un elemento de la mayor densidad posible, para lo cual los hormigones pesados de cualquier tipo proveen una solución económica, al permitir disminuir el espesor de la pantalla de protección.

En cambio, la capacitación de partículas atómicas, como son los neutrones, requiere, además, la presencia de un alto contenido de átomos de hidrogeno en la pantalla, condición que es bien cumplida por los hormigones pesados provenientes de áridos de minerales de hierro hidratado, con un gran contenido de agua de cristalización y hormigones preparados con la mayor dosis de agua posible.

Los hormigones de alta densidad además son utilizados en las fundaciones de elementos de excesiva esbeltez evitando el pando. Se puede aprovechar en el acopio como base para materiales de mucho peso. [UCN (2008)]

3.4.1 Protección en salas radiológicas

Uno de los principales usos del hormigón de alta densidad es en la protección de radiaciones. El hormigón de alta densidad usualmente utilizado es el hormigón barítico, es un hormigón en el que se utiliza árido barítico, alcanzando una densidad de 3.200 a 3.300 Kg/m³, contra la de 2.200 a 2.300 Kg/m³ del hormigón normal. Sustituye al plomo en la protección de techos y paredes a las radiaciones X y Gamma, con el consiguiente ahorro económico, pudiendo colocarse en obra en forma de muros encofrados o por un proceso de gunitado. [Lorda y Roig (2007)]

De los áridos para ser utilizados en el hormigón pesado, los más accesibles en España son la magnetita y la barita. La magnetita se encuentra en Granda, Sevilla, Badajoz, Huelva, Toledo, León entre otros, en Cataluña no se explota industrialmente aunque se han encontrado cristales pequeños. La barita se encuentra en Girona, Barcelona, Tarragona, Almería, Sevilla, Asturias y Murcia entre otras. [Mollfulleda, Joaquín (1996)].

Según los datos provisionales, la producción nacional de barita en 2005, ha alcanzado las 44,6 Kt, como se observa en la tabla 3.2, un 9,5 % superior al año anterior.

Tras el máximo alcanzado en 1997, con más de 100 Kt producidas, las cifras han sufrido una serie de altibajos, situándose en los últimos años en torno a las 44 Kt anuales. [IGME (2006)] Aproximadamente, un 38 % de la producción nacional se destina a la exportación, para su uso en lodos de sondeos. El otro sector de destino mayoritario es el de cargas, con un 36 %. Cantidades más pequeñas se dedican a metalurgia, fabricación de cemento, cerámica y otros usos. [IGME (2006)]

Provincia	2000	2001	2002	2003	20004	2005p
Almería	28 205	56 089	43 071	38 000	32 416	34 706
Zaragoza	887	-	-	-	-	-
Santander	3 561*	3 300	7 000	5 633	6 380	6 622
Córdoba	-	2 773	2 773	1 027	1 980	3 315
TOTAL Mineral (t)	32 653	62 162	52 844	44 660	40 776	44 643
SO₄Ba contenido (t)	28 735	50 640	46 503	36 757	33 998	37 054

Fuente: Estadística Minera de España

Tabla 3.2.- Producción de Barita en España. [IGME (2006)]

Las empresas productoras de baritas en España son:

- Minerales y Productos Derivados, SA (MINERSA), que continúa con la explotación de la corta Santa Matilde, en el paraje Las Rozas, Cuevas de Almanzora (Almería), con reservas de 2,5 Mt; el mineral, una vez triturado y clasificado, con peso específico de 4,25, se suministra directamente, en un 70% para sondeos en el área mediterránea y el resto para cargas, aislamiento acústico y hormigones pesados. El yacimiento dispone también de barita de baja ley, que la empresa enriquece mediante concentración gravimétrica en planta anexa de 60 Kt/a. [IGME (2006)]
- Mina Nieves, SL, con producciones del orden de las 6 Kt/a vendibles en su concesión Nieves, en Jerrafil, Torrelavega y Ofitas de Silio SL, ambas en Cantabria. [IGME (2006)]
- Minas de Barita, SL, viene extrayendo del orden de 3 Kt de barita en su mina Carmen, en Espiel, Córdoba. [IGME (2006)]
- Mineralia (Minerals de Girona S.A.), empresa que se dedica a la extracción y distribución de minerales para su uso como cargas y fillers en la industria. Los minerales que se utilizan como materia prima provienen de minas de África y Asia. A pesar de ello el acopio y almacenamiento de los mismos se realiza en Figueras. El árido que suministra se distribuye con el nombre de Bariflor 0120 y consiste en un árido barítico 01-20 mm, de densidad mínima de 4,19 y humedad máxima del 3%. La dosificación típica que usa este administrador para hormigones convencionales y de alta densidad se encuentra en anexo 4. [Álvarez, Manel (2007)]

Lorda i Roig, fundada en 1923 en Barcelona, dedicada a la producción y venta de cargas minerales para todo tipo de industrias, procedentes de yacimientos propios como

ajenos, es una empresa que además de la producción de minerales, son especialistas en la fabricación de hormigón de alta densidad, poseen una amplia experiencia en construcción de salas radiológicas en toda la península, por este motivo, la variedad de dosificaciones que presentan para hormigones de alta densidad es muy amplia. Además de buscar la alta densidad, intentan que la curva granulométrica de los áridos baríticos se adapte a la parábola de Fuller, para conseguir hormigones con una mayor compactación y resistencia mecánica. [Álvarez, Manel (2007)] Un ejemplo de dosificación de esta empresa se presenta en el anexo 5 del documento.

Otra empresa que fabrica el hormigón de alta densidad barítico en España es CT-RAD, Construcciones Técnicas, empresa dedicada específicamente al mundo de la Radioterapia, proveedora de los servicios necesarios para la adecuada construcción e instalación de Áreas de tratamiento de Radioterapia y protección radiológica. Los hormigones de alta densidad que utiliza Hormirad con diseño, registro y producción propia son los siguientes: [CT-RAD (2008)]

Hormirad®- S: densidad entre 3,20 y 3,30 Kg/dm³.

Hormirad®- Plus: densidad entre 3,30 y 3,60 Kg/dm³.

Hormirad®- Black: densidad entre 3,60 y 4,00 Kg/dm³.

También fabrica ladrillos y losetas de alta densidad Brickorad® para construcción de áreas radio protegidas de densidades de hasta 4,09 Kg/dm³. Y morteros pesados Blendyrad® con densidades hasta 3,8 Kg/dm³. Su hormigón pesado baritado, se debe fundamentalmente al uso de la barita como material árido de mayor peso específico, que sirve para alcanzar densidades máximas de 4.000 Kg/m³. Algunos ejemplos de hormigón de alta densidad usados, se dan en la tabla 3.3 con la densidad media del proyecto. [CT-RAD (2008)]

Nombre Proyecto	Densidad media gr/cm ³
Hospital Virgen de la Victoria. Málaga	3,282
Hospital Carlo Haya. Málaga	3,624
Clínica Benidorm	3,284
Unidad de radioterapia de Algalve. Faro, Portugal	3,348
Hospital Nossa Senhora Do Rosario. Barreiro, Portugal	3,272
Clínica La Milagrosa. Madrid	3,216
Hospital Torrecardenas. Almería	3,247
Hospital San Cecilio. Granada	3,220
CDIR. Logroño	3,241
Hospital Infanta Cristina. Badajoz	3,535
Hospital de Cartagena	3.606
Oncológico Miramón. San Sebastián	3,268
Centro do Radioterapia do Algarve. Faro, Portugal	3,369
Hospital Gregorio Marañón. Madrid	3,850

Tabla 3.3.- Utilización hormigón alta densidad empresa CT-RAD y densidad media respectiva. [Hormigón pesado Hormirad producción (2007)]

Como se observa en la tabla 3.3 son muchas las obras de protección radiológicas, que se han realizado utilizando el hormigón de alta densidad, pero con densidades medias del orden de 3.200 a 3.600 Kg/m³ y máxima de 3.850 Kg/m³, menores a las densidades estudiadas en este documento (4.000 y 4.500 Kg/m³).

3.4.2 Laboratorio de luz del Sincrotrón, Proyecto Túnel Alba

Túnel ALBA es el nombre que recibe el primer recinto experimental correspondiente al complejo del primer sincrotrón construido en España. Un sincrotrón es un anillo por el que viajan los electrones acelerados con una energía de hasta 3 GeV, radiando una luz que brilla más que el Sol. Esta luz, tangente a la trayectoria de los electrones, es la fuente de las investigaciones. Por este motivo pasará a través de los cabezales de los muros de alta densidad hasta llegar a los recintos experimentales. La obra del sincrotrón está situada en el Parc Tecnològic del Vallès, entre los términos municipales de Cerdanyola del Vallès y Sant Cugat, dos ciudades perfectamente comunicadas por lo que el transporte de hormigón se ve facilitado. La planta encargada de la elaboración es Lafarge, situada en Montcada i Reixac.

El hormigón pesado es de gran utilidad en este tipo de obras, ya que garantiza la estanqueidad del recinto y evita que los electrones pierdan su trayectoria circular dentro del túnel. Se especifica para el hormigón una densidad mínima de 3.200 Kg/m³, tanto para los muros in situ como para los elementos prefabricados.

En la citada obra se contempla la utilización de hormigón de alta densidad en diferentes elementos de la misma, tanto en construcción in situ como en piezas prefabricadas. Asimismo, tanto los muros in situ como los elementos prefabricados serán armados con cuantías geométricas mínimas según la instrucción EHE; por tanto, estos elementos serán de hormigón armado de alta densidad. Las condiciones exigidas al proyecto para el hormigón de muros in situ, son las que señalan a continuación:

- Resistencia mínima a la compresión a los 28 días, probeta cubica cilíndrica: 25 N/mm².
- Densidad mínima: 32 KN/m³.
- Cemento portland, mínimo contenido: 275 Kg/m³.
- Áridos naturales de tamaño máximo del árido ≤ 32 mm. Se requieren “scrap metal” (áridos metálicos) para alcanzar la densidad de 3.200 Kg/m³.
- Relación agua/cemento ≤ 0,50.

En el caso de elementos prefabricados: estos deben:

- Resistencia mínima a la compresión a los 28 días, probeta cubica cilíndrica: 25 N/mm².
- Tamaño máximo del árido ≤ 32 mm. Se requieren “scrap metal” (áridos metálicos) para alcanzar la densidad de 3.200 Kg/m³.
- Relación agua/cemento ≤ 0,45.

Inicialmente se estudian 5 dosificaciones, ver anexo 6. Los áridos utilizados son de 2 tipos: barita y magnetita, ya vistos anteriormente en apartado 3.3.1. La barita se ha suministrado en una única fracción 0/20 procediéndose a dividir la muestra por tamizado sobre malla de 4 mm, resultando dos fracciones: una fina (0/4) y una gruesa (12/20).

La magnetita se ha suministrado en dos fracciones, una gruesa (4/16) y otra de un polvo fino. Al no disponer de una curva granulométrica continua para fabricar un hormigón con magnetita, se ha empleado una arena silícea de río.

Las distintas fracciones se han mezclado adoptando como parámetro de referencia la curva de Fuller. Con estos áridos se han considerado tres estructuras de esqueleto granular que han originado las cinco dosificaciones fabricadas y ensayadas. Los esqueletos granulares considerados son los siguientes:

- Mezcla continua de barita: 40% de finos + 60% gruesos.
- Mezcla continua Magnetita: 20% polvo magnetita + 20% árido fino + 60% grueso magnetita.
- Mezcla discontinua de magnetita: 30% polvo magnetita + 5% árido fino + 65% grueso magnetita.

Como aditivo se usa un reductor de agua de alto efecto, a base de policarboxilatos. Los resultados de los ensayos de densidad del hormigón fresco, asiento de cono de Abrams y resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, realizados para las distintas dosificaciones así como la dosificación misma se encuentran en el anexo 4 del presente documento.

De las dosificaciones estudiadas la de magnetita discontinua, con un rango de consistencia más adecuada para el caso en que el armado sea considerable (blando-fluido), la resistencia a los 7 días obtenidas es muy baja (3,3 MPa), por lo que es poco recomendable en el caso de que las piezas vayan a estar sometidas a esfuerzos.

Los resultados contemplados en este estudio, ponen de manifiesto que si bien el requisito de mínima densidad ($3,2 \text{ Kg/m}^3$) se alcanza en las 5 dosificaciones ensayadas, las resistencias medias obtenidas son en conjunto bajas en relación a un valor de resistencia característica de 25 MPa exigido en el proyecto y, en particular muy bajas, en cuatro de las cinco (mezclas 2 y 3 con barita, mezcla 2 y 3 magnetita). Sólo en la mezcla 1 de barita se alcanza una resistencia media de 27,3 MPa a los 28 días. La dosificación del hormigón barítico utilizada finalmente en el sincrotrón es la que se presenta en la tabla 3.4.

Material	Dosificación materiales Kg/m ³
Árido barítico	Entre 2.700 y 3.000
Cemento tipo 42,5	Entre 325 y 350
Relación agua/cemento	0,45 y 0,60
Aditivo superfluidificante	0,7 y 2,0 s.p.c.

Tabla 3.4.- Dosificación hormigón barítico proyecto Sincrotrón Túnel Alba, Barcelona. [Hormigón pesado Hormirad producción (2007)]

La propiedad más importante de este hormigón es su densidad, se pide un mínimo de 3,2 T/m³. A continuación se muestra en la tabla 3.5 los resultados de las obtenidas.

VERTIDO 1 M ³ MUROS 12 DE MAYO DE 2007	VERTIDO 2 M ³ MUROS 26 DE MAYO DE 2007	VERTIDO 3 M ³ MUROS 9 DE JUNIO DE 2007	VERTIDO 4 M ³ MUROS 23 DE JUNIO DE 2007	VERTIDO 5 M ³ MUROS 7 DE JULIO 2007	VERTIDO 5 M ³ MUROS 4 DE AGOSTO 2007
93 m ³	123,5 m ³	103,5 m ³	108,00 m ³	176 m ³	176 m ³
DENSIDAD SOLICITADA 3,200 gr/cm ³					
DENSIDAD MEDIA OBTENIDA 3.361 gr/cm ³	DENSIDAD MEDIA OBTENIDA 3.398 gr/cm ³	DENSIDAD MEDIA OBTENIDA 3.396 gr/cm ³	DENSIDAD MEDIA OBTENIDA 3.420 gr/cm ³	DENSIDAD MEDIA OBTENIDA 3.365 gr/cm ³	DENSIDAD MEDIA OBTENIDA 3.417 gr/cm ³
RESISTENCIA SOLICITADA 25 N/mm ³ a 28 días					
Resistencia obtenida a 7 días					
23,08	26,80	25,71			

Tabla 3.5.- Resultados ensayos de densidad y resistencia hormigón alta densidad empresa CT-RAD en proyecto Sincrotrón Alba, Barcelona. [Hormigón pesado Hormirad producción (2007)]

De la tabla 3.5 podemos ver que la densidad de este hormigón barítico es efectivamente los 3.200 Kg/m³ exigidos por proyecto, y una resistencia obtenida a los 7 días de 23, 26 y 25 N/mm² cumpliendo con la mínima requerida a los 28 días de 25 N/mm².