

CAPÍTULO 2 -EL HORMIGÓN PESADO-

<u>ÍNDICE</u>	<u>Pág.</u>
2.1-INTRODUCCIÓN	4
2.2-CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA	5
2.3-EL HORMIGÓN PESADO, CONCEPTO Y DOSIFICACIONES MÁS COMUNES	7
<u>2.3.1-Hormigón pesado, concepto</u>	7
<u>2.3.2-Dosificacones más comunes</u>	8
2.4-MATERIALES	11
<u>2.4.1-Agua</u>	11
<u>2.4.2-Áridos</u>	11
<u>2.4.3-Cemento</u>	13
<u>2.4.4-Aditivos</u>	14
2.5-EQUIPAMIENTO, FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA	15
<u>2.5.1-Equipamiento</u>	15
<u>2.5.2-Fabricación</u>	15
<u>2.5.3-Puesta en obra</u>	15
2.6-CONTROL DE CALIDAD Y OTRAS ESPECIFICACIONES	17
<u>2.6.1-Control de calidad</u>	17
<u>2.6.2-Otras especificaciones usuales</u>	18
2.7-APLICACIONES DE LOS HORMIGONES DE ALTA DENSIDAD EN ESPAÑA	19
<u>2.7.1 Radiación y efectos positivos del hormigón de alta densidad</u>	20

2.1-INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se pretende dar un emplazamiento histórico al hormigón de alta densidad, a través del estudio de la evolución del hormigón como material y de las distintas aplicaciones que a lo largo de la historia han ido surgiendo.

Se estudiarán con más detalle los materiales que conforman el hormigón de alta densidad así como sus aplicaciones más usuales, las dosificaciones más comunes, el transporte y los métodos de colocación más utilizados, así como algunas características y aspectos relevantes a tener en cuenta.

Al tratarse el hormigón de alta densidad de un material singular por sus especificaciones y escaso en sus aplicaciones, es necesario seguir unos controles de calidad rigurosos y unos procedimientos por lo que a fabricación y puesta en obra se refiere muy detallados.

Se dividirá por lo tanto el siguiente capítulo en distintos apartados que pretenden exponer lo que se ha investigado sobre las cuestiones planteadas.

2.2-CONTEXTUALIZACIÓN HISTÓRICA:

No se tiene certeza sobre quien descubrió o utilizó por primera vez el hormigón, pero es probable que al mismo tiempo que el hombre dominó el fuego también descubriera el concepto de hormigón. Se cree que gracias al fuego que utilizaban los primitivos dentro de sus cavernas de piedras calcáreas, yeso y arcilla, se creaban altas temperaturas que carbonataban la piedra, transformándola en polvo. Luego, al caer las primeras lluvias, el polvo y las piedras se unirían formando una masa sólidamente cimentada.

Hallazgos contemporáneos en Lepensky, junto al Danubio, permiten afirmar que durante la edad de piedra, hace 7.500 años, los habitantes construían el suelo de sus viviendas uniendo tierra caliza, arena, grava y agua. Esta mezcla puede ser considerada como un hormigón rudimentario.

Más adelante, fueron los Egipcios, Griegos y finalmente los Romanos los que nos dejaron vestigios relacionados con el uso del hormigón. Los primeros, utilizaron como aglomerante, yeso cocido. Diversas excavaciones permiten establecer que hace 4500 años, los constructores de la pirámide de Cheops, utilizaron hormigones primitivos.

Hace más de 2300 años, fueron los griegos los que utilizaron como aglomerante tierra volcánica que extrajeron de la isla de Santorín. También existen indicios que nos permiten afirmar que utilizaron caliza calcinada que mezclaron con arcilla cocida y agua.

Y ya por último, el pueblo romano también usó hormigón en sus construcciones, para lo cual utilizaron cal como aglomerante. Se puede mencionar la construcción del alcantarillado de Roma, hace 2.300 años.

Posteriormente, hacia el año 200 antes de Cristo, se produjo un significativo avance en la optimización de los aglomerantes para construcción: el cemento Romano. Desde un lugar cercano al Vesubio obtuvieron la Puzolana, constituida básicamente por sílice. Este material mezclado con cal y agua permite conformar un aglomerante hidráulico (dicho de una cal o de un cemento que se endurece en contacto con el agua). El teatro de Pompeya (55 años antes de Cristo) se edificó con este material. Posteriormente se utilizó en la construcción de los baños públicos de Roma, el coliseo y la basílica de Constantino. La prolongada duración de estos edificios nos hace concluir que los constructores romanos utilizaban una dosificación perfectamente calculada y empleaban técnicas adicionales para mejorar la resistencia del material de construcción. El famoso historiador Plinio, en relación a la construcción de un pozo de agua, escribió: “El fondo y los lados se golpean con martillos de hierro”. De esto se desprende que los romanos utilizaron la compactación y el apisonado.

Pero aunque el origen del hormigón se remonta a la "adolescencia" de la historia, si lo consideramos como un conglomerante pétreo, la realidad es que su existencia tiene sólo algo más de un siglo. La nueva ciencia de la "hormigonería" nace con el cemento artificial, allá por 1824. Tenemos que remontarnos a esta época para atribuir al jardinero parisiense Joseph Monier el descubrimiento del hormigón armado, dando un paso aún más grande experimentando que si se introducían barras de hierro dentro del hormigón, los tiestos fabricados con este “nuevo material” podían alzarse sin desmoronarse. Había descubierto cómo aumentar la resistencia a tracción del hormigón. Desde entonces y

hasta la actualidad, este material llamado también “concreto” originario del latín *concretus* que significa “crecer unidos” o “unir”, ha ido perfeccionándose a medida que el conocimiento sobre el mismo aumentaba.

Hoy en día, la industria del hormigón está inmersa en un proceso de modernización que pasa por la obtención de marca, certificaciones de aseguramiento de calidad, así como de preservar el Medio Ambiente y la aplicación de programas rigurosos en materia de Prevención de Riesgos Laborales.

Los volúmenes de producción y distribución de hormigón en España son del orden de los 70 millones de metros cúbicos.

La Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), puesta en vigor en el año 2000, (y actualmente en revisión y a la espera de una nueva actualización) ha supuesto un salto cualitativo muy importante, elevando la resistencia mínima para hormigón armado a 25 N/mm^2 , teniendo en cuenta los diferentes ambientes, lo que en definitiva proporciona una atención preferente al concepto de durabilidad. Hoy, todos los nuevos proyectos se redactan según la EHE, y el nivel actual de hormigones suministrados de acuerdo con dicha norma se aproxima al 85%.

Por lo que a nosotros nos concierne, y ya centrados específicamente en el hormigón pesado u hormigón de alta densidad, nos tenemos que remontar a los años 60 del siglo XX para encontrar sus inicios. El hormigón pesado tiene propiedades de utilidad como material de protección contra la radiación. Su aplicación en la industria de la construcción es relativamente reciente, y coincide con el desarrollo de la energía nuclear. Una pantalla másica de este tipo de hormigón puede servir como protección contra los rayos gamma y los rayos X y además suponer un ahorro económico respecto a los hormigones ordinarios. (Ya que para la misma protección se necesitan espesores mayores). A pesar de que con las nuevas tecnologías el grado de conocimiento de este material ha aumentado considerablemente, es cierto que aún queda un largo camino que recorrer. Son pocos y puntuales las construcciones en el territorio español en las que se ha utilizado este tipo de hormigón, lo que denota su aún grado de desconocimiento y/o la dificultad para obtener los aglomerados necesarios para producirlo.

El concepto es claro, se diseñan hormigones de alta densidad para conseguir pesos unitarios superiores a los de los hormigones ordinarios. De esta manera, se pretende alcanzar pesos de entre 2.880 a 4.880 kg/m^3 y hasta 6.400 kg/m^3 . Esto se consigue usando agregados pesados incluyendo minerales de hierro tales como la magnetita y limonita, rocas de cantera tales como barita, virutas de acero y minerales de hierro, o materiales sintéticos como los ferrosos.

Los estudios existentes sobre este tipo de hormigones se han centrado en la protección que ofrecen y los daños que experimentan ante los efectos de la radiación en centrales nucleares. En el caso que nos concierne la radiación que tiene que soportar nuestro hormigón pesado es la llamada *radiación sincrotrón* (apartado 3.3 del capítulo 3). Ésta, es una radiación electromagnética característica producida por partículas cargadas (tales como electrones) que se mueven a alta velocidad (una fracción apreciable de la velocidad de la luz) en un campo magnético. Cuanto más rápido se mueven los electrones, más corta es la longitud de onda de la radiación. La emisión sincrotrón se observa en las explosiones y remanentes de supernovas, radiogalaxias y púlsares.

2.3-EL HORMIGÓN PESADO, CONCEPTO Y DOSIFICACIONES MÁS COMUNES:

2.3.1-Hormigón pesado, concepto:

La densidad es la propiedad más importante que estamos buscando en nuestro hormigón, no obstante, no debemos olvidarnos de propiedades como la elasticidad y propiedades que permitan una baja expansión térmica y unos bajos niveles de deformabilidad. Utilizando áridos naturales apropiados se pueden obtener densidades de hasta 4.1 g/cm^3 . Por este motivo, muchas veces no tendrá que ser necesario utilizar materiales sintéticos como los ferrofósforos o las bolitas de acero, que como ya se ha comentado anteriormente, siempre nos pueden dar problemas.

Los hormigones de alta densidad suelen usarse cuando el grosor de la obra que estamos ejecutando está limitado. De esta forma, con un hormigón más denso conseguimos reducir los espesores necesarios. Por este motivo, vamos a necesitar un hormigón que desarrolle una alta resistencia a la compresión así como una no afectación frente a las grandes variaciones de temperatura.

Tenemos que pedir que nuestro hormigón tenga unas propiedades físicas y químicas concretas. Además de la densidad, será importante fijarnos en propiedades como la capacidad de retención de agua, la resistencia mecánica (a compresión, impacto, abrasión, tracción, etc.), la conductividad térmica, el calor específico y el coeficiente de expansión lineal. Por ejemplo es importante conocer las características de absorción de agua de los áridos, tanto de los gruesos como de los finos, con el fin de poder determinar con detalle la cantidad de agua neta en la dosificación establecida. La resistencia a compresión de los hormigones de alta densidad debe ser del orden de dos o tres veces la resistencia de los hormigones convencionales, y la pérdida por abrasión no debe superar el 20 %.

Por lo que refiere a propiedades químicas, tendremos que pedir que los principales componentes que determinen la densidad sean lo más elevados y uniformes posibles. Se pedirán contenidos mínimos de ciertos elementos en los minerales y se recomendará que tales componentes sean lo más inertes posible para así evitar al máximo el desarrollo de posibles reacciones químicas.

Otro aspecto a tener en cuenta es la pureza y consistencia. Las propiedades y composiciones de los diferentes componentes del hormigón deben ser lo más homogéneas posible. Por ejemplo, la mayoría de las menas de hierro y bario contienen 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 tratamiento previo de lavado y optimización para su aplicación.

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 en la medida de lo posible, se deben elegir materiales cuyo machaqueo permita una buena clasificación de las granulometrías y no produzca cantidades excesivas de polvo.

2.3.2-Dosificaciones más comunes:

Como ya se ha comentado con anterioridad, los estudios existentes sobre hormigones pesados se han centrado siempre en obtener hormigones aptos para la construcción de centrales nucleares. Por este motivo, las dosificaciones más estudiadas y quizás extendidas de hormigones de alta densidad tienen que ser modificadas en algún aspecto. Para hormigones estructurales lo lógico es hablar de cantidades de cemento comprendidas entre 280 y 480 kg/m³ y una relación agua/cemento alrededor de 0.5.

Buscaremos que las curvas granulométricas se adapten a las ASTM. A pesar de estas “premisas” iniciales, es muy usual hacer cambios en obra. Al tener grandes variaciones en los áridos que utilizaremos, muchas veces es necesario compensar los contenidos de agua y por lo tanto variaremos las relaciones agua/cemento.

Durante el “boom” de construcción de centrales nucleares en España, hacia los años 70, se hicieron unos importantes estudios en el Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Universidad de California 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,...) y para ello se confeccionaron de cada hormigón las suficientes probetas cilíndricas de 15x30 cm.

Se ensayaron dos hormigones convencionales y dos de alta densidad. Las conclusiones que se extrajeron fueron muy interesantes:

- 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 módulo de elasticidad y de Poisson también crecen un orden de un 5-8% y 10-15% respectivamente.
- 2- El módulo de elasticidad se asemeja al módulo calculado con la ecuación del 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 el otro con perdigones de acero), presentan valores elevados de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad.

El contenido máximo de agua es el peso del agua cuando el hormigón aún está fresco.

En hormigones de alta densidad la mezcla proporcionada debe asegurar que la resistencia a compresión diseñada, la densidad y la correcta trabajabilidad se consiguen. La composición química y el contenido de agua deberán asegurar las condiciones de blindaje que previamente se hayan definido.

En la Tabla 2.1, extraída de la normativa ACI, se pueden distinguir varias dosificaciones para diferentes hormigones de alta densidad. Como se puede apreciar en la tabla, esta propiedad varía en función de los áridos utilizados.

Conventionally placed concrete								
Density (unit weight) kg/m ³	Compressive strength months (Mpa)	Cement kg/m ³	Heavy aggregate (kg/m ³)			Mix water kg/m ³	Water content kg/m ³	
			Fine	Coarse	Min		Max	
4810	34,5	376	Iron Shot	3120	0	192	56	192
			Magnetite	1120				
4810	33,6	386	Ferrophosphorous	1470	Ferrophosphorous	2740	203	203
4200	36,9	380	Ferrophosphorous	1120	Ferrophosphorous	1120	205	205
			Barite	560	Barite	800		
3720	44,8	389	Magnetite	1380	Magnetite	1760	184	216
3560	41,4	309	Barite	1380	Barite	1680	186	186
3510	44,8	399	Hydrous iron	1310	Hydrous iron	1600	192	280
3040	39,6	335	Serpentine	800	Magnetite	1700	208	304

Tabla 2.1 Proporciones para el hormigón de alta densidad (American Concrete Institut)

Preplaced aggregate method									
5540	207	320	Magnetite	700	Punchings	4330	181	56	189
4810	34,5	317	Magnetite	670	Magnetite	1070	175	66	192
					Punchings	2560			
4210	41,4	356	Limonite	450	Limonite	960	195	208	351
					Punchings	2240			
4200	33,1	317	Magnetite	670	Magnetite	1950	175	75	202
					Punchings	1070			
3920	No	312	Serpentine	370	Serpentine	796	157	No	No
					Punchings	2320			
3910	34,5	280	Magnetite	590	Magnetite	2880	155	77	191
3440	34,5	364	Limonite	460	Limonite	450	200	175	320
					Magnetite	1950			

Tabla 2.2- Proporciones para el hormigón de alta densidad (American Concrete Institut)

2.4-MATERIALES:

2.4.1-Agua:

El agua utilizada en el amasado de hormigones de alta densidad debe seguir las recomendaciones de la ACI 301. Como regla general, el agua de mezclado debe ser potable. No debe contener impurezas que puedan afectar la calidad del hormigón. No debe tener ningún tipo de sabor o contener limo u otras materias orgánicas en suspensión. Aguas muy duras pueden contener elevadas concentraciones de sulfatos y pozos de agua de regiones áridas pueden contener sales disueltas dañinas. Si es cuestionable, el agua puede ser químicamente analizada.

2.4.2-Áridos:

El hormigón de alta densidad se consigue con el uso de agregados pesados incluyendo minerales de hierro tales como la magnetita y la limonita, rocas de cantera tales como la barita, virutas de acero y minerales de hierro o materiales sintéticos tales como los ferrosforosos. Parece lógico pensar que los áridos de alta densidad son más caros y requieren tratamientos especiales en lo que se refiere a la dosificación en el hormigón y su puesta en obra. Los áridos de alta densidad tienden a segregarse en el seno de la pasta de cemento, por lo que se necesita un tamaño de grano más fino que el usual. A pesar de esto, las granulometrías de los áridos pueden ser las convencionales. La arena no tiene porqué ser especial, siempre que sea admisible por el peso unitario. Debe ser limpia, filosa, bien graduada y libre de limo, arcilla o materiales orgánicos. La gravedad específica o módulo de fineza puede ser especificada para mezclas especiales tales como hormigones de agregado grueso reducido.

Se debe evitar la incorporación de aire, a causa del detrimento de la densidad y por consiguiente no puede ser usada para mejorar la trabajabilidad del hormigón. Por este motivo, muchas veces la solución es usar arenas más finas y elevados contenidos de cemento para obtener un hormigón cohesivo y con una buena trabajabilidad.

Densidad y composición: La densidad y la composición de los agregados deben cumplir los requerimientos de la ASTM C637 y la ASTM C638. Si se usan como árido grueso agregados metálicos, tenemos que verificar que el 100% del peso quede retenido en el tamiz de 9,5mm y que están libres de pedazos finos, planos o alargados de metal.

Envío y almacenaje: Los agregados se deberán transportar y almacenar de una manera que asegure una pequeña o nula pérdida de finos así como una protección frente a la contaminación por otros materiales.

A continuación, en la Tabla 2.2 se muestran los principales tipos de áridos usados en la fabricación de hormigón pesado. En la tabla se hace distinción entre áridos naturales y sintéticos (ordenados de mayor a menor densidad)

<i>Áridos sintéticos</i>	<i>Densidad aproximada (g/cm³)</i>
Bolitas de acero	7.5
Ferrosilicio	6.7
Ferrofósforo	6.0
Ferroboro	5.0
Escorias pesadas	5.0
Carburo de boro	2.5

<i>Áridos naturales</i>	<i>Densidad aproximada (g/cm³)</i>
Hematita	4.5
Ilmenita	4.5
Magnetita	4.5
Barita	4.2
Limonita	3.5
Goethita	3.5
Colemanita	2.5
Serpentina	2.5
Bauxita	2.0

Tabla 2.2 Áridos empleados en la fabricación de hormigón pesado (Elaboración propia)

Se redacta ahora una breve explicación de los más destacados y utilizados:

Los minerales ferrosos, ilmenita, hematina y magnetita, de densidades comprendidas entre 4.1 y 4.8 pueden producir hormigones con densidades comprendidas entre 3.2 y 4.8. Los minerales ferrosos son utilizados fácilmente en forma usual y pueden ser procesados con facilidad en áridos gruesos y finos. En la figura 2.1 podemos apreciar una imagen del mineral de ilmenita.



Figura 2.1 Mineral de ilmenita (www.wikipedia.org)



La hematina que podemos apreciar en la Figura 2.2, se encuentra en abundancia pero con muy poca riqueza, por lo que el peso específico aparente es relativamente bajo. Se ha encontrado ilmenita en Huelva, pero es en una mina que aún sólo se explota a nivel de investigación.

Figura 2.2 Hematina roja (www.wikipedia.org)

Un problema que surge para el suministro de la magnetita (figura 2.3) es la granulometría y la forma de los granos. La magnetita adecuada para árido grueso, en cuanto a tamaño, se produce casi exclusivamente por machaqueo, por lo que se obtienen

áridos angulosos que le dan un aspecto áspero al hormigón y difícilmente trabajable. Por este motivo estos hormigones son difícilmente bombeables.



Figura 2.3 Cristales de magnetita (www.wikipedia.org)



La barita es una roca de cantera compuesta de un 90 a 95% de Sulfato de bario con un peso específico de entre 4.1 y 4.3. Se puede procesar con cierta facilidad para transformarla en árido fino y grueso, y normalmente se obtiene un hormigón de densidad 3.7. En la figura 2.4 podemos apreciar una imagen del mineral de barita.

Figura 2.4 Imagen del mineral de barita (elaboración propia)

El ferrosufuroso tiene una alta densidad de entre 5.8 y 6.3, lo que le permite producir un hormigón con densidades de alrededor de 4.0 a 5.6. Sin embargo, hay que tomar precauciones con su uso porque cuando se mezcla con cemento Pórtland genera un gas inflamable y posiblemente tóxico el cual puede desarrollar altas presiones si es confinado. No tenemos conocimiento de que en nuestro país se hayan fabricado hormigones a base de áridos de acero o ferrofósforos.

Los pedazos y las virutas de hierro y acero tienen la densidad más alta de todas, de entre 6.2 y 6.7. Esto permite realizar hormigones de densidades de alrededor de 4.80. Para obtener densidades máximas, las virutas y barritas de hierro se utilizan como árido grueso. En cambio, los áridos de acero a menudo no son deseables debido a su mala granulometría y a que presentan problemas de segregación. Muchas veces con los áridos de acero es difícil conseguir unas correctas adherencias y resistencias a la compresión.

2.4.3-Cemento:

Los hormigones de alta densidad no deben llevar cementos especiales. Todos aquellos cementos que cumplan las consideraciones de la ASTM C150 o la ASTM C595 y consigan las propiedades físicas requeridas, siendo utilizables para fabricar hormigones convencionales, podrán ser usados para fabricar hormigones de alta densidad. Si nos fijamos en las recomendaciones de la normativa americana ACI, tenemos que tener en cuenta que si los áridos tienen componentes que puedan reaccionar con los álcalis, deben utilizarse cementos con bajo contenido de estos componentes. Si la construcción requiere hormigón en masa, será preciso utilizar cementos de bajo calor de hidratación.

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.

Es aconsejable no utilizar aditivos, a no ser que el hormigón se ponga en servicio bajo condiciones que supongan ciclos de hielo/deshielo. En principio los aditivos tienden a disminuir la densidad del hormigón, no obstante, si la mezcla es lo suficientemente densa como para aceptar un 4% de aire ocluido, la utilización de aditivos comportará notables mejoras en las condiciones de trabajabilidad y homogeneización de la mezcla.

El cemento debe ser inspeccionado en busca de grumos causados por la humedad. Las bolsas de cemento deben ser examinadas en busca de rasgaduras, perforaciones u otros defectos. Si el cemento va a ser agregado por bolsas, el peso de las bolsas debe ser revisado por lotes y la variación no debe ser mayor de un 3 %.

2.4.4-Aditivos:

Aunque la norma especifica claramente que únicamente no deben usarse aditivos en hormigones blandos y hormigones fluidos, no es recomendable utilizar aditivos que no sean plastificantes en hormigones de alta densidad a no ser que esté justificada su utilización y se conozcan claramente las desventajas que pueden ocasionar. Los plastificantes sí deben utilizarse, ya que facilitan la puesta en obra.

Los aditivos más comunes son los siguientes:

- a) Aceleradores de endurecimiento: Cumplen la función de acelerar el endurecimiento del hormigón. Permite aumentar la resistencia del hormigón a edades tempranas (primeros 28 días), logrando una disminución de los tiempos de obra.
- b) Retardadores de fraguado: Funcionan retardando el inicio de fraguado, otorgando mayores tiempos para la colocación del hormigón. Muy utilizado en hormigón premezclado donde éste es transportado largas distancias y transcurre un tiempo considerable desde su preparación hasta su colocación. Normalmente produce menores resistencias en edades tempranas.
- c) Incorporadores de aire: Ayudan a incorporar micro-partículas de aire al hormigón. Comenzó a utilizarse para hormigones sometidos a congelamiento y deshielo, ya que el aire incorporado absorbe la expansión del hielo, evitando así que éste rompa el hormigón. Además, la incorporación de aire mejora la trabajabilidad del hormigón en estado fresco y la durabilidad en estado endurecido. La incorporación de aire disminuye la resistencia a la compresión del hormigón. El aire incorporado por este mecanismo oscila entre un 2 y un 7% dependiendo de la dosis de aditivo y la cantidad de áridos finos. También permite hormigones de menores densidades y con mejores propiedades para el aislamiento acústico y térmico.

- d) **Plastificantes:** Aumentan la trabajabilidad del hormigón fresco, permitiendo una mayor docilidad de éste. Permite utilizar menos agua en la mezcla para alcanzar una misma fluidez, mejorando la relación agua/cemento (A/C) y, por lo tanto, la resistencia del hormigón. Con la utilización de plastificantes se alcanzan reducciones de hasta un 20% del agua requerida en la mezcla. Este aditivo se utiliza normalmente para: Mejorar la trabajabilidad del hormigón fresco, mejorar la resistencia del hormigón endurecido (por necesitar menos cantidad de agua) y disminuir la dosis de cemento en la mezcla de hormigón.
- e) **Superplastificantes:** Básicamente tienen los mismos efectos sobre el hormigón que los plastificantes, pero en grados mayores. Con la aplicación de superplastificantes se alcanzan reducciones de hasta un 60% del agua requerida en la mezcla del hormigón. Son ampliamente usados principalmente en la elaboración de hormigones de alta resistencia y autocompactantes.

2.5-EQUIPAMIENTO, FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA:

2.5.1-Equipamiento:

El equipamiento utilizado para mezclar los hormigones convencionales es el que se va a utilizar para la fabricación del hormigón pesado. Se tendrá que tomar un especial cuidado para no recargar los equipos.

Algo importante que se tendrá que tener en cuenta cuando se vaya a verter el hormigón y poner en obra, es la disposición de los travesaños y apuntalamientos necesarios para que los encofrados resistan los empujes del hormigón fresco (que en este caso al estar hablando de un hormigón de alta densidad serán $\gamma_p/2.4$ mayores).

2.5.2-Fabricación:

Para fabricar hormigones de alta densidad no se tiene que seguir ningún proceso específico. El método de fabricación será el convencional, teniendo siempre en cuenta no sobrecargar las amasadoras ni camiones hormigonera. Tenemos que tener presente que al ser un hormigón de alta densidad el volumen máximo de amasado y transporte para hormigón convencional deberá multiplicarse por la relación de $2.4/\gamma_p$ (siendo γ_p el peso unitario del hormigón de alta densidad) para tener el máximo volumen a fabricar y transportar.

2.5.3-Puesta en obra:

Se han realizado estudios sobre las formas de colocación de hormigones de alta densidad. Previamente se deben hacer cuidadosas consideraciones sobre los posibles métodos. Es importante tener en cuenta factores como los agregados, la densidad, la resistencia, la composición de las mezclas, la cantidad de hormigón requerido, e equipo disponible, la complejidad de las formas, el tipo y número de los embebidos, condiciones de colocación y experiencia de los ejecutores.

a) **Método convencional:**

La puesta en obra de los hormigones de alta densidad está sujeta a unas condiciones que no se tienen que tener en cuenta en los hormigones convencionales. Hay unos

estándares de calidad que se deben cumplir ya que el hormigón pesado es más susceptible a variaciones que el hormigón convencional.

El hormigón de alta densidad es muy propenso a sufrir segregaciones durante su puesta en obra. Estas segregaciones no sólo afectan en una disminución de la resistencia del hormigón sino que provocan variaciones en la densidad que afectan de forma muy grave la forma de trabajar el hormigón.

Es el procedimiento usado cuando estamos tratando con hormigones convencionales. Para hormigones de alta densidad este método es utilizable cuando el hormigón no contiene pedazos de acero como árido grueso. Coloquialmente podemos hablar de él como el “vertido con cubilote”. Los áridos, cemento y agua son mezclados juntos y después colocados en las formas. Utilizando este método de vertido tendremos que tener en cuenta que el hormigón de alta densidad, al tener un peso específico superior, para un mismo volumen, pesa más. Por lo tanto se tendrán que tomar precauciones para no sobrecargar las grúas, camiones grúa o cualquier otro medio con el que se vaya a verter el cubilote de hormigón. Se tendrán que tomar precauciones también para no sobrecargar las hormigoneras y evitar la segregación de los agregados durante el amasado.

Otro punto a tener en cuenta es el vibrado. Con este método la vibración durante la colocación es beneficiosa pero debe ser usada con discreción.

b) Bombeo:

Esta técnica de vertido se puede utilizar cuando la curva granulométrica esté comprendida en un huso apto para el bombeo, y la forma de los áridos sea apropiada. En principio, el bombeo es un método rechazable para la puesta en obra de hormigones de alta densidad. Por este motivo, en caso de querer utilizar este procedimiento, se recomienda efectuar pruebas de bombeo en las condiciones extremas para verificar la bombeabilidad de la mezcla antes de adoptar este sistema de colocación. Realmente, la máxima densidad que puede obtenerse por este método es bastante menor que la del hormigón colocado por otros métodos. En la práctica no suele utilizarse con frecuencia ya que lo normal es trabajar con hormigones secos para aumentar la densidad. No obstante, y a pesar de que los áridos gruesos suelen proceder de mineral machacado (con formas muy irregulares y angulosas que dificultan el bombeo), cada vez existen más profesionales que aseguran que se puede bombear hormigón de alta densidad en casi cualquier situación.



En la figura 2.5 podemos apreciar un camión bomba típico de este tipo de sistema de colocación.

Figura 2.5 Imagen de un hormigonado mediante el sistema de colocación por bombeo (elaboración propia).

c) Hormigonado con áridos precolocados (“Prepack/Coldcrete”):

Este es el método adecuado cuando parte de los áridos o bien su totalidad sean de acero o hierro. Usando esta técnica consistente en colocar primero el árido grueso dentro del encofrado y posteriormente rellenar con mortero de cemento, arena y agua los huecos que dejan entre sí los áridos. Bajo ciertas condiciones hay varias ventajas de este método sobre los convencionales:

- i. La segregación del agregado grueso, especialmente con trozos de acero, puede ser minimizada.
- ii. El hormigón de densidad y composición uniforme puede ser colocado más fácilmente en formas confinadas y alrededor de los embebidos.
- iii. Para materiales similares se obtiene con mayor facilidad una mayor densidad y homogeneidad.
- iv. Pueden usarse combinaciones de varios materiales como árido grueso.
- v. El Prepack asegura que el árido pesado queda distribuido uniformemente en el escudo protector y que no existen grandes huecos de aire.

Sin embargo, existen también varias desventajas de este método:

- i. Son pocas las empresas que están especializadas en este procedimiento de colocación.
- ii. La terminación de la superficie superior en un área grande de hormigón es más dificultosa y cara.
- iii. Generalmente el hormigón colocado por este método es más caro que el colocado por procedimientos convencionales.

d) Otros métodos de colocación:

Ocasionalmente también se puede colocar una capa de varios centímetros de mortero entre los encofrados y cubrirla luego con una capa de árido pesado, el cual se introduce mediante la ayuda del vibrado o el apisonado. Este método requiere una ejecución muy cuidadosa y controlada pero es ideal para hormigones de muy alta densidad, sobretodo los fabricados a base de áridos de acero ya que evita pasar todo el árido por la amasadora.

2.6-CONTROL DE CALIDAD Y OTRAS ESPECIFICACIONES:**2.6.1-Control de calidad:**

Todos los materiales utilizados para la fabricación del hormigón, así como el propio hormigón pesado una vez fabricado, deben seguir unos controles de calidad previos y posteriores a la puesta en obra.

La complejidad de las estructuras en las que se suele utilizar el hormigón pesado hace difícil la obtención de muestras una vez se ha hormigonado y por lo tanto suele impedir la verificación del correcto funcionamiento del hormigón endurecido.

Además, no es aconsejable la toma de muestras en hormigones pesados fabricados con áridos metálicos. Al tomar un testigo se destruye la matriz formada por el árido metálico y la pasta de cemento, haciendo así que el hormigón trabaje de una forma que no es la que se había previsto.

El control de calidad del cemento se hará siguiendo las normas ASTM C150 y ASTM C595. Dependiendo de la obra se tendrán que hacer ensayos en la planta y ensayos en la recepción del cemento ya en la obra.

La calidad de los áridos deberá determinarse según los métodos de las ASTM C33 para áridos de peso normal y según las normas ASTM C637 para los áridos pesados. Otras características que tendrán que estar fijadas en el diseño del hormigón y que deberán ser verificadas son las cantidades de agua y de cemento.

En cuanto lo que refiere a las adiciones tendremos que seguir lo que dicta la norma ASTM 494, aunque las recomendaciones para el control y admisión debemos buscarlas en la ACI 212.2R

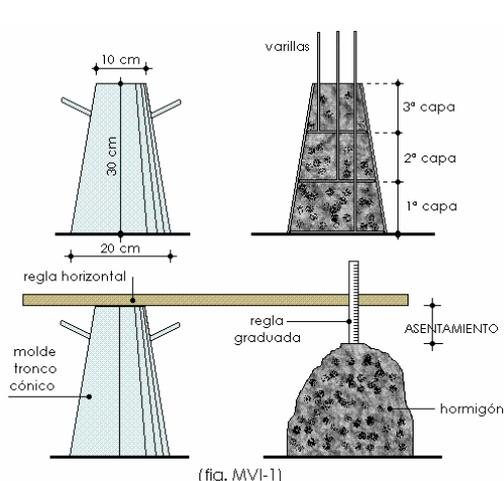
El control sobre el hormigón ya fabricado se hará según la ACI 318, aunque los ensayos para determinar propiedades como la uniformidad se realizarán según la norma ASTM C94.

2.6.2-Otras especificaciones usuales:

a) Tiempo transcurrido:

Para temperaturas normales, el tiempo total desde el inicio de mezclado para descargar no debe exceder de 1,5 h y debe ser reducido en tanto aumente la temperatura. La mezcla debe ser descargada antes de las 300 revoluciones del tambor.

b) Asentamiento:



Ensayo de consistencia o asentamiento por el método del Cono de Abrams. La prueba de asentamiento debe ser hecha en cada vaciado, de acuerdo con las normas de control de calidad, cuanto más estricto sea el control de calidad, mayor muestreo debe tomarse.

En la figura 2.6 podemos ver un dibujo de un ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams.

Figura 2.6 Ensayo de asentamiento mediante el cono de Abrams (elaboración propia)

c) Retemperado:

No se permitirá bajo ningún concepto la adición de agua a la mezcla de hormigón para compensar la pérdida de asentamiento resultante de la demora en la entrega o vaciado.

2.7-APLICACIONES DE LOS HORMIGONES DE ALTA DENSIDAD EN ESPAÑA:

Hasta el inicio del “boom” de la construcción de centrales nucleares (en las que los hormigones pesados se empezaron a utilizar como hormigones de blindaje o de lastrado), en España no existían antecedentes publicados sobre el uso de este tipo de hormigones y se sabía que, de forma esporádica, se habían utilizado. Por este motivo fue necesario partir de datos americanos (que eran los que más experiencia tenían hasta entonces) para iniciar una nueva investigación y experimentación. La aplicación de este tipo de hormigones en la industria de la construcción es relativamente reciente

Para la fabricación de estos hormigones es necesario disponer de algunos de los áridos que se ha comentado con anterioridad en este texto. Los más asequibles en nuestro país son la magnetita y la barita. Se sabe que existen minas de magnetita en León, Badajoz, Murcia y algunas otras. Se encuentra barita en provincias como Zaragoza, Guadalajara o Tarragona. A pesar de ello, debido a las cantidades que se necesitarán, es posible que alguna de las anteriores minas sea incapaz de suministrar los áridos con las características necesarias y en las cantidades deseadas. No obstante, no se justifica montar en la obra unas instalaciones de clasificación y machaqueo especiales para la granulometría deseada, por lo que habrá que buscar en el mercado lo más aproximado a nuestras necesidades.

Para la construcción de centrales nucleares como la de Ascó se realizaron muchos experimentos y se tantearon varias dosificaciones con magnetita (que es la que mejor se adaptaba a las curvas granulométricas deseadas y posee facilidad de suministro). Se realizaron ensayos de adherencia de barras, de tracción brasileña y de compresión. Se ensayaron hormigones convencionales y de alta densidad para posteriormente comparar los resultados. Una vez conocidas las granulometrías de los áridos y la forma de rotura de las probetas, se pudieron obtener conclusiones.

Una de las conclusiones más importantes que se obtuvo fue que los áridos de magnetita que se habían suministrado tenían un porcentaje de finos inferior a lo necesario, por lo que no era aconsejable la fabricación de hormigón con los áridos tal y como llegaban a la obra. Al no existir una buena cohesión, durante la puesta en obra se producirían segregaciones importantes.

La resta de conclusiones fueron todas positivas. Los hormigones que se obtenía tenían una densidad media de 3.500 kg/m^3 y eran aptos para ser armados.

La aplicación de los hormigones de alta densidad en las centrales nucleares se centra básicamente en las ventajas que ofrece frente a la protección contra la radiación. A pesar de que se ha utilizado también como hormigón de lastrado, es importante conocer algunos conceptos básicos sobre los tipos de radiación y la protección que el hormigón de alta densidad ofrece.



Figura 2.7 Imagen de la cúpula de hormigón de alta densidad de la central nuclear de Ascó (elaboración propia)

2.7.1 Radiación y efectos positivos del hormigón de alta densidad:

Primeramente, tenemos que tener en cuenta que en una central nuclear se producen diferentes tipos de radiaciones. Existen radiaciones primarias (radiaciones que proceden de la desintegración de los elementos radioactivos utilizados como combustible nuclear) y radiaciones secundarias (producto de las colisiones entre las radiaciones primarias y los materiales circundantes). Dentro de los distintos tipos de radiación, encontramos la radiación ionizante.

Esta radiación son partículas o fotones procedentes de los átomos, ya sea desde su núcleo o desde su corteza electrónica, con energía suficiente para ionizar la materia, desplazando los electrones de sus órbitas. Cuando de forma general hablamos de radiación, nos estamos refiriendo a la ionizante.

Las radiaciones ionizantes ya sean electromagnéticas o corpusculares poseen una energía, longitud de onda y frecuencia tales que al interactuar con un medio le transfieren energía suficiente para separar a un electrón de su átomo. La ionización es, por lo tanto, la formación de un par de iones, el negativo (el electrón libre) y el positivo (el átomo sin uno de sus electrones).

Esta radiación, suele ser un fenómeno de la radiactividad, que procede de los átomos y está compuesta principalmente por partículas alfa, beta y rayos gamma. También es posible su aparición debido a la excitación de los electrones en las cortezas atómicas mediante el calor o la aplicación de intensos campos electromagnéticos de rayos X.

La radiactividad o radioactividad en sí, de la cual la radiación ionizante es una consecuencia, es un fenómeno físico natural por el cual algunas sustancias o elementos químicos llamados radiactivos, emiten radiaciones que tienen la propiedad de impresionar placas fotográficas, ionizar gases, producir fluorescencia, atravesar cuerpos opacos a la luz ordinaria, etc. Debido a esa capacidad se las suele denominar radiaciones ionizantes (en contraste con las no ionizantes). Las radiaciones emitidas pueden ser electromagnéticas en forma de rayos X o rayos gamma, o bien partículas, como pueden ser núcleos de Helio, electrones o positrones, protones u otras.

Una propiedad de los isótopos es que son "inestables". Es decir que se mantienen en un estado excitado en sus capas electrónicas o nucleares, con lo que para alcanzar su estado fundamental deben perder energía. Lo hacen en emisiones electromagnéticas o en emisiones de partículas con una determinada energía cinética. Esto se produce variando la energía de sus electrones (emitiendo Rayos X), sus nucleones (rayo gamma) o variando el isótopo (al emitir neutrones, protones o partículas más pesadas), y en varios pasos sucesivos, con lo que un isótopo pesado puede terminar convirtiéndose en uno mucho más ligero, como el uranio que con el transcurrir de los siglos acaba convirtiéndose en plomo.

Con el hormigón de alta densidad pretendemos protegernos de esta radiación de una forma efectiva. Por lo tanto, es imprescindible que las propiedades del hormigón no se vean afectadas.

Debido a la exposición del hormigón a rayos gamma o neutrones, en los niveles que se dan generalmente bajo las condiciones típicas en obras de tipo reactor nuclear, las propiedades del material no se ven afectadas. Sin embargo, no debemos confundir términos y pensar que el hormigón no sufre ninguna agresión a pesar de estar en ambientes tan singulares. La energía de la radiación absorbida por el hormigón se convierte en calor y da lugar a incrementos importantes de la temperatura en el hormigón. Estos incrementos pueden llegar a ser de hasta 100 ° C o más, con lo que la temperatura del hormigón en las paredes de un reactor puede llegar a alcanzar varios centenares de grados a menos que se tomen medidas de refrigeración para eliminar el exceso de calor acumulado.

Por estos motivos, es importante que los áridos tengan estabilidad térmica, y sean buenos atenuadores. De ahí el uso de áridos pesados, ya que su elevada densidad hace que sean más estables y que los gradientes de temperatura no sean tan elevados. Se necesita de áridos densos para atenuar los neutrones rápidos (que son los más energéticos), ya que los neutrones lentos ya se atenúan con el contenido de hidrógeno del hormigón. No obstante, tendremos que vigilar que estos contenidos sean como mínimo del 0,45% en peso del hormigón.