



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO

CEDEX

CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

INFORME TÉCNICO

para

**Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y Subsuelo
(AETESS)**

RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCIÓN DEL HORMIGONADO DE PILOTES Y PANTALLAS “IN SITU”

INFORME PARCIAL Nº 1

TOMO ÚNICO

Clave CEDEX: 80-507-5-001

Madrid, Julio 2009

Laboratorio de Geotecnia



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

TÍTULO:

RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCIÓN DEL HORMIGONADO DE PILOTES Y PANTALLAS "IN SITU"

INFORME PARCIAL Nº 1

TOMO ÚNICO

CLIENTE:

Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y Subsuelo
(AETESS)

EL PRESENTE INFORME CONSTITUYE UN DOCUMENTO OFICIAL DE ESTE TRABAJO Y, DE ACUERDO CON LAS NORMAS GENERALES DEL ORGANISMO, SU ENTREGA SUPONE EL CUMPLIMIENTO DE LAS ACTUACIONES TÉCNICAS DEL MISMO REFERENTES A LA MATERIA OBJETO DEL INFORME.

VALIDEZ OFICIAL

VISTO EL CONTENIDO DEL INFORME Y SIENDO ACORDE CON LAS CLAUSULAS DEL CONVENIO DE COLABORACION CORRESPONDIENTE, SE PROPONE AUTORIZAR SU EMISIÓN.

EL DIRECTOR DEL LABORATORIO
DE GEOTECNIA

Fdo. Fernando Pardo de Santayana

AUTORIZA LA EMISIÓN DEL INFORME:

Madrid, a de julio de 2009

EL DIRECTOR GENERAL DEL CEDEX

Fdo. Mariano Navas Gutiérrez

SÓLO SON INFORMES OFICIALES DEL CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE OBRAS PÚBLICAS (CEDEX) LOS REFRENDADOS POR SU DIRECCIÓN GENERAL.

INDICE

1. ANTECEDENTES	1
2. TIPOS DE CIMENTACIONES.....	2
2.1 Introducción	2
2.2 Cimentaciones directas o superficiales.....	2
2.2.1 Zapatas aisladas	3
2.2.2 Zapatas combinadas o corridas.....	4
2.2.3 Pozos de cimentación	4
2.2.4 Emparrillados.....	5
2.2.5 Losas	5
2.3 Cimentaciones profundas: Pilotes.....	6
2.4 Elementos de contención.....	9
2.4.1 Pantallas.....	9
2.4.2 Muros.....	12
2.5 Cimentaciones especiales de hormigón in situ	13
2.6 Bibliografía	14
3. MATERIALES COMPONENTES Y SU DOSIFICACIÓN	16
3.1 Introducción	16
3.2 Cemento	17
3.2.1 Cementos adecuados.....	17
3.2.2 Recomendaciones adicionales	20
3.3 Agua.....	21
3.4 Áridos.....	22
3.4.1 Prescripciones generales	22
3.4.1.1 Condiciones físico-químicas	23
3.4.1.2 Condiciones físico-mecánicas	24
3.4.1.3 Granulometría y forma del árido:	24
3.4.1.4 Tamaño máximo del árido:	26
3.4.2 Prescripciones particulares	26
3.4.3 Recomendaciones para la selección de los áridos para cimentaciones especiales.....	27
3.5 ADITIVOS	27
3.5.1 Prescripciones generales	27
3.5.2 Aditivos de aplicación en cimentaciones especiales	28
3.5.2.1 Plastificantes y superplastificantes	29
3.5.2.2 Retardadores	30
3.5.2.3 Aceleradores.....	31
3.5.2.4 Aireantes.....	31
3.6 ADICIONES MINERALES.....	32
3.6.1 Adiciones utilizables	32
3.6.2 Requisitos de utilización	33
3.6.3 Efectos sobre el hormigón	34
3.6.4 Otras adiciones.....	35
3.7 Dosificación del hormigón	37
3.7.1 Aspectos generales	37
3.7.2 Ajuste granulométrico.....	37
3.7.3 Recomendaciones de dosificación	39
3.7.3.1 Contenidos de cemento	39
3.7.3.2 Relación agua/cemento	40
3.7.3.3 Contenido de finos	41
3.7.3.4 Dosificación de aditivos y adiciones	41



3.7.3.5 Ejemplos de dosificación	42
3.7.4 Casos particulares de dosificación.....	42
3.8 Bibliografía.....	43
4. EJECUCIÓN DEL HORMIGONADO	45
4.1 Introducción	45
4.2 AMASADO.....	45
4.3 TRANSPORTE	47
4.4 PUESTA EN OBRA	48
4.4.1 Operaciones previas	49
4.4.2 Colocación del hormigón.....	50
4.4.2.1 Colocación del hormigón con Tubo Tremie.....	51
4.4.2.2 Colocación por bombeo.....	54
4.4.2.3 Otros sistemas de colocación.....	55
4.4.2.3.1 Vertido directo.....	55
4.4.2.3.2 Pilotes ejecutados mediante inyección ("prepacked").....	55
4.4.3 Incidentes durante la colocación del hormigón	56
4.4.3.1 Colocación con Tubo Tremie.....	56
4.4.3.2 Colocación por bombeo.....	58
4.4.3.3 Hormigonado en tiempo frío y en tiempo caluroso.....	58
4.4.4 Precauciones después del hormigonado	60
4.4.5 Operaciones especiales en casos particulares de ejecución.....	61
4.4.5.1 Hormigonado de pilotes con entubación recuperable	61
4.4.5.2 Hormigonado de pilotes con camisa perdida	62
4.4.5.3 Hormigonado de pilotes de barrena continua.....	62
4.4.5.4 Pantallas de pilotes secantes	63
4.4.5.5 Inyección externa de pilotes in situ.....	63
4.4.5.6 Extracción de juntas en muros pantalla.....	63
4.5 Bibliografía.....	63
5. CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN	65
5.1 Introducción	65
5.2 ASPECTOS GENERALES	65
5.3 DOCILIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO	65
5.4 CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN FRESCO.....	66
5.4.1 Medida de la consistencia	66
5.4.2 Consistencias adecuadas para el hormigón de cimentaciones especiales	70
5.5 EXUDACIÓN DEL HORMIGÓN FRESCO	71
5.6 CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	73
5.6.1 Resistencia a compresión	73
5.6.2 Resistencia a tracción	73
5.6.3 Módulo de elasticidad.....	73
5.6.4 Retracción	74
5.6.5 Fluencia.....	76
5.6.6 Permeabilidad	77
5.7 Bibliografía.....	78
6. DURABILIDAD.....	80
6.1 Introducción	80
6.2 Definición de ambientes agresivos.....	80
6.3 Definición de la vida útil de las estructuras.....	87
6.4 Procesos de degradación del hormigón y de las armaduras.....	88
6.4.1 Corrosión de las armaduras debido a la carbonatación del hormigón	88
6.4.2 Corrosión de las armaduras por la acción de los cloruros	91
6.4.3 Ataque químico	92

6.4.3.1 Ataque por sulfatos	92
6.4.3.2 Ataque por ácidos	94
6.4.3.3 Lixiviación por aguas puras	95
6.4.4 Acción de la helada	95
6.4.5 Erosión	97
6.4.6 Reacción álcali-árido	97
6.5 Protección del hormigón frente a la agresividad ambiental	98
6.5.1 Materiales constituyentes	98
6.5.1.1 Corrosión de las armaduras debido a la carbonatación del hormigón	98
6.5.1.2 Ataque químico	100
6.5.1.2.1 Ataque por sulfatos	100
6.5.1.2.2 Ataque por ácidos	104
6.5.1.2.3 Lixiviación por aguas puras	105
6.5.1.3 Acción de la helada y sales fundentes	105
6.5.1.4 Erosión	107
6.5.1.5 Reacción álcali-árido	108
6.5.2 Requisitos de dosificación	109
6.5.3 Impermeabilidad del hormigón	111
6.5.4 Recubrimiento de las armaduras	112
6.5.4.1 Requisitos de los recubrimientos	112
6.5.4.2 Separadores	113
6.5.5 Abertura de fisura	114
6.5.6 Medidas especiales de protección	115
6.6 Bibliografía	116
7. CONTROL DE CALIDAD	119
7.1 Introducción	119
7.2 Aspectos generales	120
7.3 Control de los materiales constituyentes del hormigón	121
7.3.1 Aspectos generales	121
7.3.2 Control de los componentes	122
7.4 Control del hormigón	124
7.4.1 Distintivos de calidad	124
7.4.2. Comprobaciones documentales y experimentales antes del comienzo del hormigonado	125
7.4.3 Ensayos previos del hormigón	126
7.4.4 Ensayos característicos del hormigón	127
7.4.4.1 Ensayos característicos de resistencia	128
7.4.4.2 Ensayos característicos de dosificación para comprobar la durabilidad	128
7.4.5 Control durante el hormigonado	130
7.4.5.1 Control documental	130
7.4.5.2 Toma de muestras	131
7.4.5.3 Control de la docilidad	132
7.4.5.4 Control de la resistencia	134
7.4.5.4.1 Control estadístico	135
7.4.5.4.2 Control de la resistencia del hormigón al 100 por 100	140
7.4.5.4.3 Decisiones derivadas del control de resistencia	140
7.4.5.4.4 Control de la resistencia en la normativa para cimentaciones especiales	140
7.4.6 Certificado final del hormigón suministrado	141
7.5 Control de ejecución	141



7.5.1 Plan de autocontrol del Constructor en las actividades de vertido y puesta en obra del hormigón.....	142
7.5.2 Control de la ejecución mediante inspección de los procesos.....	143
7.5.2.1 Programación del control de ejecución	143
7.5.2.2 Comprobaciones antes del vertido	146
7.5.2.3 Comprobaciones durante el vertido.....	147
7.5.2.4 Comprobaciones después del vertido	148
7.5.3 Parámetros de control y su frecuencia.....	149
7.5.4 Tolerancias.....	153
7.5.4.1 Pilotes.....	153
7.5.4.2 Pantallas.....	154
7.6 Control de la cimentación terminada: ensayos de información	155
7.6.1 Ensayos de integridad:.....	157
7.6.1.1 Transparencia sónica en pilotes y pantallas.....	157
7.6.1.2 Técnicas de eco e impedancia mecánica en pilotes	158
7.6.1.3 Ventajas y limitaciones de los diferentes ensayos de integridad	159
7.6.1.3.1 Transparencia sónica.....	159
7.6.1.3.2 Ensayos de Eco e Impedancia mecánica	160
7.6.1.4 Planificación de los ensayos de integridad.....	161
7.6.2 Ensayos de extracción de testigos y ensayos no destructivos del hormigón...	162
7.7 Registros del control	166
7.8 Bibliografía.....	168
8. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE	171
8.1 Introducción	171
8.2 Materiales y dosificación.....	171
8.2.1 Aspectos generales.....	171
8.2.2 Cemento.....	172
8.2.3 Áridos	172
8.2.4 Aditivos	173
8.2.5 Dosificación	174
8.3 Propiedades del hormigón.....	177
8.3.1 Hormigón fresco	177
8.3.1.1 Docilidad del hormigón autocompactante	177
8.3.1.2 Procedimientos de ensayo	178
8.3.1.3 Requisitos de autocompactabilidad.....	183
8.3.1.4 Clases de autocompactabilidad.....	184
8.3.2 Hormigón endurecido	187
8.3.2.1 Resistencia a compresión y tracción	187
8.3.2.2 Módulo de elasticidad	188
8.3.2.3 Retracción	188
8.3.2.4 Fluencia	189
8.3.2.5 Calor de hidratación	189
8.3.2.6 Adherencia a las armaduras.....	189
8.4 Ejecución	189
8.5 Durabilidad.....	191
8.5.1 Control de calidad	192
8.6 Aplicaciones de cimentaciones especiales.....	192
8.7 Bibliografía.....	198
9. RESUMEN	199





1. ANTECEDENTES

Con fecha 20 de Abril de 2007, se firmó un Convenio entre la Asociación de Empresas de la Tecnología del Suelo y Subsuelo (AETESS) y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), para la realización de "Recomendaciones para la Ejecución del Hormigonado de Pilotes y Pantallas "in situ", dentro del Acuerdo Marco firmado por AETESS y el CEDEX para colaborar en materias de interés común.

Para la ejecución de este documento, se programaron los siguientes trabajos:

- A) Recopilación de la normativa y documentación técnica existente sobre hormigones para la ejecución del hormigonado de pilotes y pantallas in situ.
- B) Compendio de los resultados obtenidos en casos prácticos realizados y que se realicen durante este trabajo.
- C) Recomendaciones sobre el hormigón para pilotes y pantallas: Componentes, clasificación, ejecución, características durabilidad y control de calidad.

Para su realización, se constituyó un grupo de trabajo formado por D. Enrique Dapena, Dr. Ingeniero de Caminos del Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, Coordinador del Grupo, Dña. Pilar Alaejos, Dr. Ingeniero de Caminos del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, Ponente y D. José María Echave, D. Leoncio Prieto y D. Gerardo Marote, Ingenieros de Caminos de AETESS.

En este Informe Parcial se recoge el estado del arte del proceso de hormigonado de pilotes y pantallas, elaborado por este grupo de trabajo.

2. TIPOS DE CIMENTACIONES

2.1 Introducción

La cimentación es el elemento que recibe los esfuerzos de la estructura y los transmite al terreno garantizando que las tensiones sean inferiores a las admisibles de éste y los asientos compatibles con la deformabilidad de aquélla.

Según que el terreno capaz de compatibilizar asientos y deformaciones se encuentre próximo a la superficie o en profundidad, se utilizan las cimentaciones directas y las profundas. Otro nombre de estas cimentaciones profundas es el de cimentaciones indirectas, poco usado en la actualidad, a pesar de ser quizá más exacto ya que indica que debajo de la construcción se colocan unos elementos suplementarios que ya no pertenecen realmente a ella, y cuya misión es transmitir o diluir las cargas. La cimentación por pilotajes es la más antigua y la más extendida de las cimentaciones profundas¹.

Por otra parte, se denominan elementos de contención a las estructuras encargadas de servir de contención de las tierras en los proyectos de edificación y de obras públicas. Según que verifiquen su trabajo sin cambio de forma o sufriendo deformaciones, se clasifican en estructuras de contención rígidas (muros) y flexibles (pantallas)².

2.2 Cimentaciones directas o superficiales

Una cimentación directa es aquella que reparte las cargas de la estructura en un plano de apoyo horizontal (Figura 1). Cuando las condiciones lo permitan se deben emplear cimentaciones directas, que habitualmente, pero no siempre, se construyen a poca profundidad bajo la superficie, por lo que también son llamadas cimentaciones superficiales³.

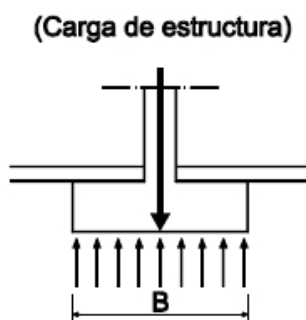
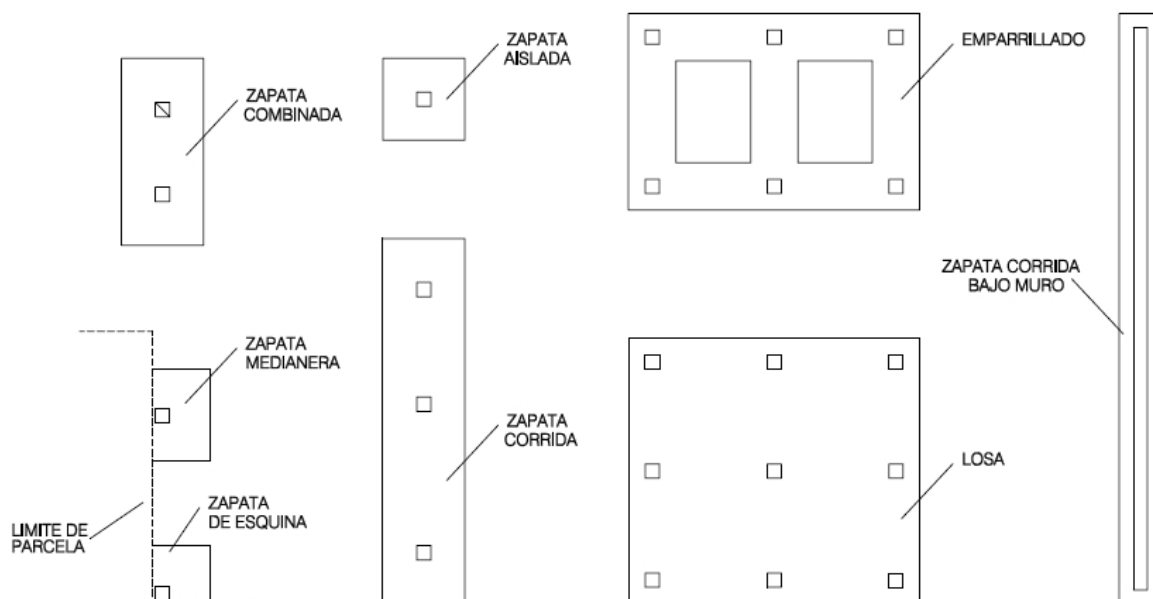


Figura 1. Cimiento directo.

A su vez, las cimentaciones directas pueden ser elementos puntuales en forma de zapatas, tener directriz lineal como las cimentaciones corridas o combinadas, o extenderse en superficie como los emparrillados y las losas de cimentación². En la Figura 4.2 se muestran los diferentes tipos de cimentaciones directas.

Figura 2. Tipos de cimentaciones directas³.

2.2.1 Zapatas aisladas

Son cimentaciones superficiales de carácter puntual, encargadas de recibir la carga de un pilar o de dos pilares adosados. Es la cimentación normal de los pilares de un edificio cuando el terreno es firme y competente, se puede cimentar con una presión media alta y se esperan asentamientos pequeños o moderados³. Están indicadas hasta la cota -3, a partir de la cual comienzan a ser más interesantes los pozos de cimentación².

De acuerdo con la posición que ocupan en el solar, las zapatas aisladas pueden ser centradas, de medianería y de esquina (ver Figura 2). En estas dos últimas tipologías, que surgen en los pilares perimetrales, la excentricidad exige vigas centradoras que garanticen la estabilidad³.

Desde el punto de vista estructural se tendrán en cuenta las prescripciones de la instrucción EHE (Figura 3), y se considerarán estructuralmente rígidas las zapatas cuyo vuelo "v", en la dirección principal de mayor vuelo, sea menor o igual que dos veces el canto "h" ($v \leq 2h$). Las zapatas se considerarán flexibles en caso contrario ($v > 2h$). Esta definición de rigidez estructural no presupone ningún comportamiento específico sobre la distribución de presiones en el terreno³.

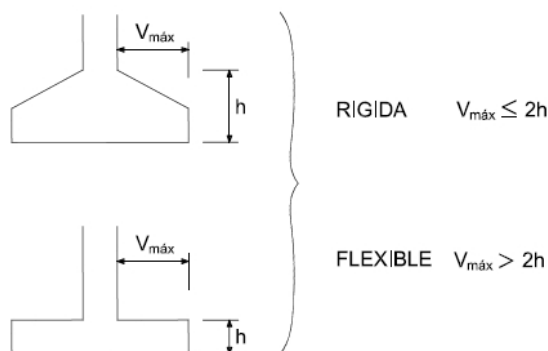


Figura 3. Concepto de rigidez estructural.

2.2.2 Zapatas combinadas o corridas

Cuando la capacidad portante del terreno sea pequeña o moderada, existan varios pilares muy próximos entre sí, o bien las cargas por pilar sean muy elevadas, el dimensionado de los cimientos puede dar lugar a zapatas aisladas muy cercanas, incluso solapadas. En ese caso se podrá recurrir a la unión de varias zapatas en una sola, llamada zapata combinada cuando recoja dos o más pilares, o zapata corrida cuando recoja tres o más alineados (ver Figura 2) ³.

El diseño de zapatas combinadas o corridas podrá ser recomendable para evitar movimientos o asentamientos diferenciales excesivos entre varios pilares, ya sea por una variación importante de sus cargas o por posibles heterogeneidades del terreno de cimentación. Asimismo, si en la base de pilar se producen momentos flectores importantes, lo que puede dar lugar a excentricidades grandes, las zapatas combinadas y corridas podrán constituir una solución apropiada, ya que podrán facilitar que, en su conjunto, la carga total se sitúe relativamente centrada con el centro de gravedad de la zapata ³.

Un caso particular de zapata corrida será la empleada para cimentar muros. En el caso de muros de sótano en los que los pilares forman parte del muro sobresaliendo del mismo, el cimiento del muro más el pilar puede considerarse una zapata corrida que generalmente tendrá un ensanchamiento en la zona del pilar en sentido transversal ³.

2.2.3 Pozos de cimentación

Este tipo de cimentación directa consiste en un macizo alojado en una excavación en forma de pozo. Constituyen la solución adecuada a suelos competentes situados entre los niveles -3 y -6 m, aunque en algunos casos son interesantes a cotas superiores e inferiores ².

Los pozos más habituales en edificación son de dos tipos (véase Figura 4). El primero consiste en un relleno de la excavación desde la cota de apoyo con hormigón pobre, situando la zapata encima de éste de forma que se transmitan las cargas a la profundidad deseada. El segundo tipo, menos habitual, consiste en bajar la cota de zapata hasta alcanzar el nivel de terreno competente de apoyo, elevando a continuación un plinto de gran rigidez con el fin de evitar problemas de pandeo ³.

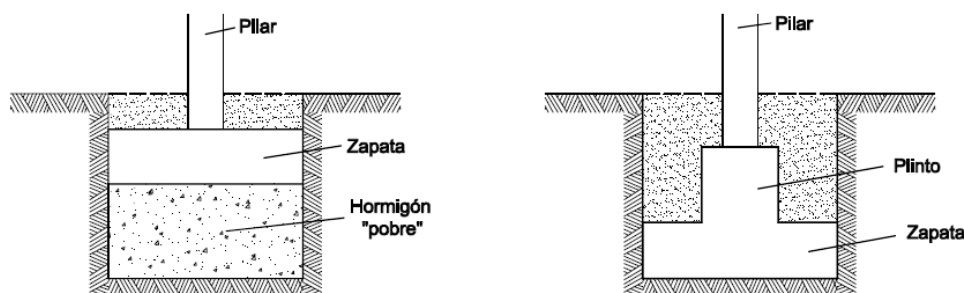


Figura 4. Tipos principales de pozos de cimentación.

2.2.4 Emparrillados

En este caso todos los pilares de la estructura quedarán recogidos en una única cimentación, consistente en zapatas corridas entrecruzadas en malla habitualmente ortogonal (ver Figura 2). Al quedar así reunidos todos los apoyos de la estructura en una sola cimentación se podrá conseguir una considerable rigidización con el fin de disminuir el problema de la heterogeneidad del terreno impidiendo grandes asientos diferenciales³.

Se puede emplear cuando el terreno presente baja capacidad de carga y elevada deformabilidad, o bien muestre heterogeneidades que hagan prever asientos totales elevados y, consiguientemente, importantes asientos diferenciales³.

Se considera rentable hasta que su planta ocupa la mitad aproximada del solar, a partir de la cual empieza a ser interesante la losa de cimentación o el pilotaje².

Se incrementa su efectividad si los soportes forman una retícula ortogonal coincidente con los ejes del emparrillado².

2.2.5 Losas

Es una cimentación superficial en el sentido de ubicarse próxima a la superficie libre del solar y de que sus dimensiones en planta son muy elevadas en relación con su espesor. Consiste en una losa armada bidireccional de la que arrancan los pilares del edificio² (ver Figura 2).

Suponen el límite de las cimentaciones superficiales, siendo necesario hacer uso de las profundas si las cargas del edificio, incrementadas en el peso propio de la losa y deducido el de la excavación, superan la mitad de la tensión admisible del terreno².

Las losas de cimentación pueden ser de los siguientes tipos: continua y uniforme, con refuerzos bajo pilares, con pedestales, con sección en cajón, nervada, aligerada³ (ver Figura 5).

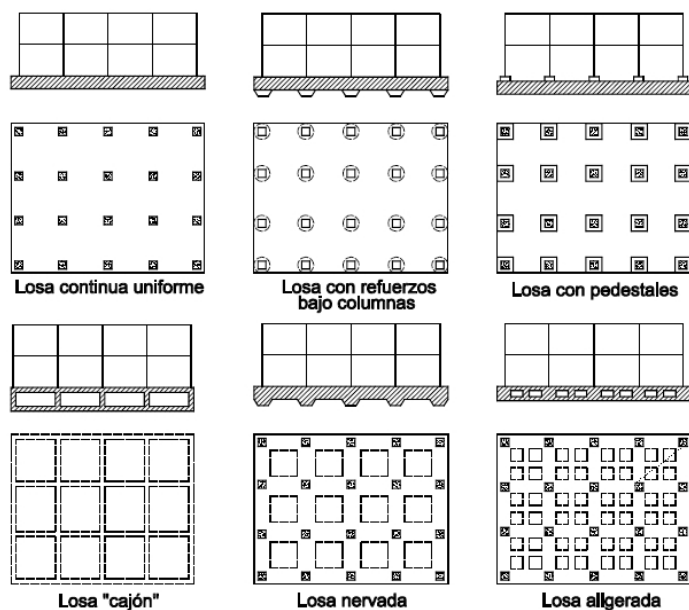


Figura 5. Tipos de losas de cimentación.

Las losas de cimentación se utilizarán preferentemente para reducir los asientos diferenciales en terrenos heterogéneos, o cuando exista una variabilidad importante de cargas entre apoyos cercanos. El sistema de cimentación por losa tiende a integrar estas heterogeneidades, aunque a cambio de una distribución irregular de las presiones sobre el terreno³.

También podrá ser conveniente una solución mediante losa cuando, aunque el terreno de apoyo sea homogéneo y resistente, el edificio contenga sótanos y su cota inferior se sitúe por debajo del nivel freático. En estos casos se debe tener en cuenta los posibles empujes ascensionales del agua subálvea (subpresión) y los requisitos de estanquidad necesarios³.

Cuando el edificio vaya a disponer de sótanos y se vaya a cimentar por medio de losa, es posible que el peso de las tierras excavadas sea semejante al peso total del edificio. En ese caso, la presión unitaria neta que transmitirá la losa al terreno será del mismo orden de magnitud que la presión efectiva preexistente, y los asientos serán probablemente de pequeña entidad. Esta situación particular se denomina cimentación compensada³.

2.3 Cimentaciones profundas: Pilotes

Una cimentación es profunda si su extremo inferior, en el terreno, está a una profundidad superior a 8 veces su diámetro o ancho. Cuando la ejecución de una cimentación superficial no sea técnicamente viable, se debe contemplar la posibilidad de realizar una cimentación profunda³. Para ello, se realiza una cimentación por pilotaje, encargada de transmitir a capas profundas del terreno las cargas que recibe de la estructura a través de pilotes, elementos estructurales de directriz lineal y gran longitud comparada con su sección transversal².

Las cimentaciones profundas se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- a) pilote aislado: aquél que está a una distancia lo suficientemente alejada de otros pilotes como para que no tenga interacción geotécnica con ellos³;

- b) grupo de pilotes: son aquellos que por su proximidad interaccionan entre sí o están unidos mediante elementos estructurales lo suficientemente rígidos, como para que trabajen conjuntamente³;
- c) zonas pilotadas: son aquellas en las que los pilotes están dispuestos con el fin de reducir asientos o mejorar la seguridad frente a hundimiento de las cimentaciones. Suelen ser pilotes de escasa capacidad portante individual y estar regularmente espaciados o situados en puntos estratégicos³;

Los distintos tipos de pilotes se pueden clasificar en función de diferentes criterios³:

1) En cuanto a la forma de trabajo, los pilotes se clasifican en (Figura 6):

- 1.1) pilotes por fuste: en aquellos terrenos en los que al no existir un nivel claramente más resistente, al que transmitir la carga del pilotaje, éste transmitirá su carga al terreno fundamentalmente a través del fuste. Se suelen denominar pilotes "flotantes"².
- 1.2) pilotes por punta: en aquellos terrenos en los que al existir un estrato claramente más resistente, las cargas del pilotaje se transmitirán fundamentalmente por punta. Se suelen denominar pilotes "columna".

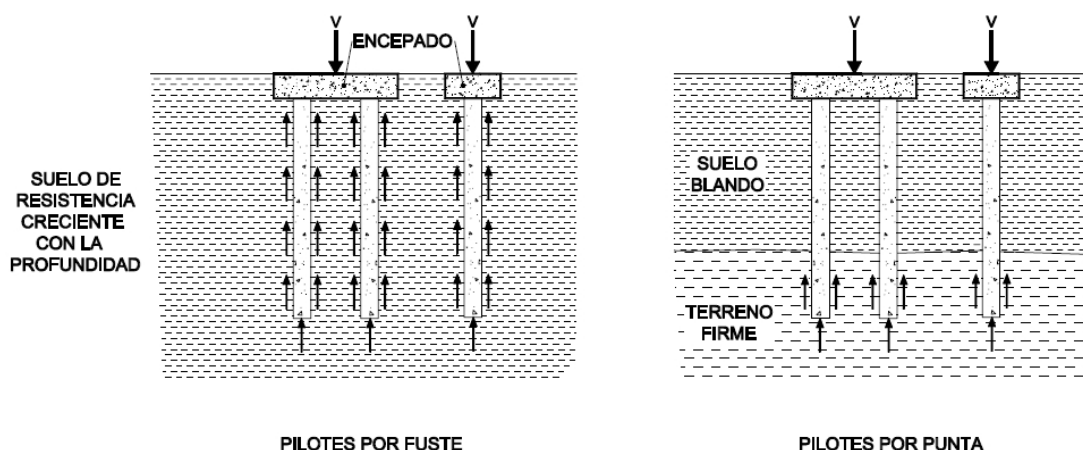


Figura 6. Esquema de cimentaciones profundas.

- 1.3) pilotes que trabajan por punta y por fuste: es el caso más habitual. En este caso, los esfuerzos que recibe el pilote se transmiten al terreno circundante por rozamiento del fuste y por compresión en su punta.
- 2) Por el tipo de material del pilote. Para la construcción de pilotes se podrán utilizar los siguientes materiales³:
- 2.1) hormigón "in situ": se ejecutarán mediante excavación previa, aunque también podrán realizarse mediante desplazamiento del terreno por hincado o con técnicas mixtas (excavación y desplazamiento parcial). El desplazamiento tiene la ventaja de mejorar las características del suelo por la compactación y disminución de huecos. La



excavación, a cambio, atraviesa determinados estratos no franqueables para los anteriores².

- 2.2) hormigón prefabricado: podrá ser hormigón armado u hormigón pretensado o postensado. Suelen emplearse hormigones de elevada resistencia (H-35 o superior) para reducir secciones²;
- 2.3) acero: se podrán utilizar secciones tubulares o perfiles en doble U o en H.
- 2.4) madera: se podrá utilizar para pilotar zonas blandas amplias, como apoyo de estructuras con losa o terraplenes;
- 2.5) mixtos, como los de acero tubular rodeados y rellenos de mortero.

3) Por la forma y dimensión de la sección transversal:

- 3.1) La forma de la sección transversal del pilote podrá ser circular o casi circular (cuadrada, hexagonal u octogonal) de manera que no sea difícil asimilar la mayoría de los pilotes a elementos cilíndricos de una cierta longitud L y de un cierto diámetro D³.
- 3.2) Como caso excepcional deben considerarse los pilotes-pantalla. Los pilotes-pantalla, o elementos portantes de pantalla, suelen ser de hormigón armado y con una sección recta rectangular con una proporción longitud-anchura tal, que la asimilación a la forma circular es difícil³.
- 3.3) Micropilotes: son aquellos compuestos por una armadura metálica formada por tubos, barras o perfiles introducidos dentro de un taladro de pequeño diámetro, pudiendo estar o no inyectados con lechada de mortero a presión más o menos elevada. En el caso de micropilotes perforados⁷, el diámetro de fuste es normalmente menor o igual que 300 mm; en micropilotes hincados, el diámetro de fuste o la dimensión máxima de la sección transversal del fuste es menor o igual que 150 mm.

4) Por el procedimiento constructivo:

- 4.1) Pilotes prefabricados de desplazamiento por hincá: la característica fundamental de estos pilotes estriba en el desplazamiento del terreno que su ejecución puede inducir, ya que el pilote se introduce en el terreno sin hacer excavaciones previas que faciliten su alojamiento en el terreno. Las formas de hincar pilotes pueden ser diferentes según se use vibración o se emplee, como suele ser más frecuente, la hincá o percusión con golpes de maza. Los pilotes hincados podrán estar constituidos por un único tramo, o por la unión de varios tramos, mediante las correspondientes juntas, debiéndose, en estos casos, considerar que la resistencia a flexión, compresión y tracción del pilote nunca será superior a la de las juntas que unan sus tramos.
- 4.2) Pilotes hormigonados "in situ": son aquellos que se ejecutan en excavaciones previas realizadas en el terreno. Se pueden agrupar según que la perforación pueda conseguirse por desplazamiento del terreno o con extracción del mismo⁴. En el primer grupo se encuentran: pilotes de desplazamiento con azuche, pilotes de desplazamiento con tapón de gravas y pilotes de desplazamiento por rotación. En el segundo grupo se

encuentran: pilotes de extracción sin sostenimiento, pilotes de extracción con entubación recuperable, pilotes de extracción con camisa perdida, pilotes de extracción con lodos tixotrópicos, pilotes de barrena continua hormigonados por el tubo central de la barrena.

- 4.3) También podrán ejecutarse pilotes de carácter intermedio entre los dos anteriores, tales como los hincados en preexcavaciones parciales de menor longitud y mayor diámetro que el pilote.

La selección del tipo de pilote se realiza en cada caso dependiendo de:

- La estabilidad y características del terreno
- La geometría del pilote (diámetro y longitud)
- El nivel freático y existencia de corrientes de agua
- Condicionantes de plazos de ejecución de la obra
- Particularidades de la obra: espacio disponible, accesos, etc.

Los sistemas de hormigonado habitualmente empleados en la construcción de pilotes "in situ" son de hormigonado continuo: bien con bomba en pilotes de barrena continua o con tubería Tremie en el resto de casos.

2.4 Elementos de contención

2.4.1 Pantallas

Se denomina pantallas a los elementos de contención de tierras que se emplean para realizar excavaciones verticales en aquellos casos en los que el terreno, los edificios u otras estructuras cimentadas en las inmediaciones de la excavación, no serían estables sin sujeción, o bien, se trata de eliminar posibles filtraciones de agua a través de los taludes de la excavación y eliminar o reducir a límites admisibles las posibles filtraciones a través del fondo de la misma, o de asegurar la estabilidad de éste frente a fenómenos de sifonamiento. Se construyen desde la superficie del terreno previamente a la ejecución de la excavación y trabajan fundamentalmente a flexión³.

La pantalla cumple una labor estructural de contención de tierras, y de impermeabilización del vaso, pero no puede considerarse un elemento totalmente terminado ni absolutamente impermeable, dadas las características intrínsecas del material y del proceso de ejecución. En cualquier caso será necesario prever un acabado final de su superficie, ya que se hormigona contra el propio terreno. En general, la fase crítica en la vida de la pantalla es la de la ejecución³.

La pantalla es un muro de contención hormigonado en el interior de una zanja profunda, sin necesidad de encofrado ni de entibación, ya que las paredes se autosostienen en los terrenos cohesivos y con lodos bentoníticos en los restantes. Por consiguiente, es la solución previa al vaciado de solares con suelos de baja calidad, en presencia de niveles freáticos, o si existe peligro de hundimientos en las calles y en las edificaciones colindantes. De aquí que estén indicadas²:



- a) En el aprovechamiento de solares en profundidad.
- b) En la contención de tierras, limitando movimientos y consecuentemente reduciendo riesgos en los edificios adyacentes.
- c) En la impermeabilización de infraestructuras sometidas a carga hidráulica.
- d) Como cimentación de los pilares perimetrales.

Resultan imprescindibles en las obras subterráneas, cuando no es posible la ejecución tradicional de muros de contención o de sótano. Y en particular para construir²:

- Sótanos en las obras de edificación.
- Galerías y túneles en obras urbanas.
- Muros de contención y pasos inferiores en las obras públicas.
- Diques y ataguías en las obras hidráulicas.
- Muelles y diques secos en las obras portuarias.
- Dada la gran capacidad de carga y la posibilidad de conformar secciones de la geometría y de la inercia deseada, los elementos de pantalla se aplican también como cimentaciones profundas.

Las condiciones esenciales de las pantallas que las diferencian de los muros y las entibaciones, son³:

- a) se ejecutan previamente a la excavación;
- b) en general alcanzan una profundidad bajo el fondo de excavación que no es pequeña en relación con la altura libre de la pantalla;
- c) el empotramiento de la pantalla en el terreno por debajo del fondo de la excavación es, en general, indispensable para su estabilidad, constituyendo en ocasiones el único elemento que la proporciona y siendo el peso propio de la pantalla un factor de influencia muy escasa o nula;
- d) son estructuras flexibles y resisten los empujes del suelo deformándose.

Las pantallas pueden requerir en muchos casos sujeción en uno o varios puntos de su altura libre, además del empotramiento en el terreno por debajo del nivel de excavación, bien sea por estabilidad, resistencia o para impedir excesivas deformaciones horizontales o verticales del terreno en el trasdós³.

En la siguiente tabla se recogen los diversos tipos de pantallas³:

Pantallas ejecutadas enteramente in situ	Pantallas continuas de hormigón	
	Pantallas de pilotes	
Pantallas de elementos prefabricados	Hincadas	Tablestacas de hormigón armado o pretensado
		Tablestacas de acero
		Tablestacas de madera
	De paneles de hormigón armado o pretensado que se colocan en una zanja previamente excavada	

- 1) Pantallas continuas de hormigón (muro-pantalla): Generalmente consisten en la excavación de una zanja, cuyo espesor varía normalmente entre 0,45 y 1,20 m, por paños o módulos de un ancho que oscila generalmente entre un valor mínimo correspondiente a la apertura de la cuchara y un valor máximo en función de la estabilidad del terreno, movimientos y deformaciones admisibles u otras condiciones de la obra. Esta anchura oscila generalmente de 2,5 a 7 m.
- 2) Un panel puede tener una o varias jaulas de armadura a lo largo de su longitud. En terrenos con cohesión y por encima del nivel freático, las zanjas, de las dimensiones antes indicadas para cada módulo y de la profundidad total de la pantalla, podrán ser estables sin necesitar ningún elemento de contención, debido, en parte, al efecto tridimensional asociado a sus proporciones³.

Sin embargo, en general, y especialmente si se trata de suelos sin cohesión, como arenas y limos, bajo el nivel freático, las zanjas no serán estables por sí mismas. La estabilidad sin entibación se conseguirá llenando cada módulo de zanja con lodos tixotrópicos (suspensiones en agua de arcillas tixotrópicas, de muy alta plasticidad, como bentonitas, sepiolitas, etc; o suspensiones poliméricas)³.

- 3) Pantallas de pilotes³: Comúnmente las pantallas de pilotes se efectúan mediante pilotes perforados, aunque en determinadas ocasiones podrían ejecutarse con pilotes prefabricados hincados.

Si no hay necesidad de que la pantalla sea estanca, los pilotes podrán disponerse con una cierta separación entre ellos, con separaciones entre ejes inferiores al doble del diámetro de los pilotes, salvo justificación en contra.

En la estabilidad del terreno entre pilotes separados se podrá tener en cuenta el efecto de arco. La separación entre pilotes se determinará en función de la naturaleza del terreno, de los esfuerzos a resistir y de la capacidad de flexión de los pilotes.

Cuando la excavación haya de permanecer abierta mucho tiempo, y sobre todo, si el terreno es meteorizable y pierde rápidamente sus características resistentes en contacto con el aire, debe protegerse la banda de terreno que queda vista entre pilotes por medio de hormigón proyectado.

Cuando haya que excavar bajo el nivel freático será necesario que los pilotes sean secantes entre sí, por lo que la pantalla deberá efectuarse mediante pilotes perforados o aplicar otras técnicas de tratamiento del terreno entre pilotes.

- 4) Pantallas de tablestacas³: Se consideran como tales las alineaciones de paneles prefabricados o tablestacas, que se hincan en el terreno a golpes o por vibración para constituir, debidamente enlazadas, pantallas resistentes o de impermeabilización, que sirvan de protección para la ejecución de otras obras.

La selección del tipo de pantalla se realiza en cada caso dependiendo de:

- La estabilidad y características del terreno
- El nivel freático y existencia de corrientes de agua
- Condicionantes de plazos de ejecución de la obra

2.4.2 Muros

Los muros se definen como elementos de contención destinados a establecer y mantener una diferencia de niveles en el terreno con una pendiente de transición superior a lo que permitiría la resistencia del mismo, transmitiendo a su base y resistiendo con deformaciones admisibles los correspondientes empujes laterales. En el caso de muros de sótano, éstos se utilizan para independizar una construcción enterrada del terreno circundante³.

Por los materiales empleados, los muros generalmente son de hormigón en masa o armado, mampostería o fábrica³.

Por su concepto estructural se distinguen, entre otros, los muros de gravedad, de gravedad aligerados, de contrafuertes, en L o en ménsula, de sótano y los realizados por bataches a medida que se ejecuta la excavación³ (Figura 7).

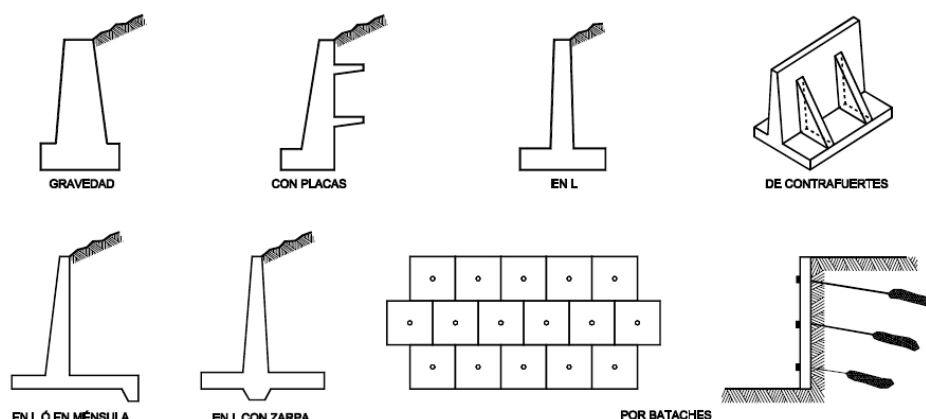


Figura 7. Tipos de muros

- 1) Los muros de gravedad son elementos de contención cuyas dimensiones son suficientemente grandes como para equilibrar los empujes únicamente por su peso, sin que se produzcan tracciones en la fábrica u hormigón o siendo éstas despreciables. Estos muros en general no precisan armadura y son los más resistentes a los agentes destructivos. Sus formas son muy variadas, y para el enlace de las partes construidas sucesivamente suelen dejarse retallos o llaves.
- 2) En el caso de muros de gravedad aligerados, al reducirse el espesor del alzado del muro, las pequeñas tracciones correspondientes se absorben con una ligera armadura. El pie ha de sobresalir en ménsula para mantener el ancho de base necesario, por lo que es necesario también la colocación de armadura en la base de la zapata. En algunos casos, el muro se aligera recortando su trasdós en la zona donde las presiones transmitidas al terreno son menores.
En el caso de disponer una o varias placas en ménsula en el trasdós del muro, al aliviar los empujes por efecto "sombra", permite una menor sección de muro.
- 3) En los muros en L o en ménsula, la base del muro está constituida por una losa o zapata sobre la que se levanta el alzado, que suele ser de espesor reducido, absorbiéndose las

flexiones de la ménsula mediante armadura sencilla o doble. Para mejorar la resistencia al deslizamiento, estos muros pueden llevar zarpas centrales o en el talón posterior y si los esfuerzos son importantes el empotramiento en la zapata podrá reforzarse mediante cartabones.

Los muros de contrafuertes son una variante de los anteriores en los que el ancho del muro se refuerza a determinados intervalos para reducir las flexiones del muro y conseguir además una orientación más favorable de los empujes. Las placas frontales pueden ser planas o abovedadas, de directriz circular preferentemente. Si es necesario, pueden llevar zarpas en el talón de la placa de base.

- 4) Los muros realizados por bataches generalmente están constituidos por placas, de hormigón armado, de unos 3 x 3 m, y espesor, entre 40 y 80 mm, hormigonadas contra el terreno, cada una de las cuales se ancla al terreno una vez endurecido el hormigón. Los bataches se ejecutan a medida que se efectúa la excavación, sin iniciar la apertura de un batache en tanto que la placa superior no se encuentre anclada y se solaparán para dar continuidad a las armaduras, tanto en sentido horizontal como en sentido vertical, formando módulos en general con al menos 3 anclajes. Salvo justificación en contra, este procedimiento se utilizará únicamente en excavaciones sobre el nivel freático. Estos muros no se empotran en el terreno por debajo del nivel de excavación por lo que su estabilidad se logrará exclusivamente por medio de los anclajes.
- 5) Los muros de sótano generalmente tienen forma de cajones cerrados y están sometidos al empuje del terreno y, en su situación definitiva, a las cargas procedentes de forjados, y en ocasiones a las de soportes o muros de carga que nacen de su cúspide. Los forjados actúan como elementos de arriostramiento transversal. En este tipo de muros los efectos derivados de la contención pueden ser secundarios, sobre todo en edificios de varias plantas.

2.5 Cimentaciones especiales de hormigón in situ

La clasificación general de las cimentaciones descrita en los apartados anteriores y de amplia aceptación, se rige por diferentes tipos de criterios.

Sin embargo, para el caso concreto de cimentaciones de hormigón, y desde el punto de vista de la ejecución del hormigonado, ámbito de aplicación de la presente publicación, cabe clasificar las cimentaciones en tres grandes grupos:

- Cimentaciones convencionales que utilizan la tecnología habitual del hormigón, en cuanto a las dosificaciones y los medios de puesta en obra aplicados.
- Cimentaciones especiales con hormigón prefabricado, cuyos elementos se fabrican en instalaciones industriales y se colocan en obra utilizando técnicas de puesta obra especiales.
- Cimentaciones especiales de hormigón in situ, que precisan hormigones de dosificación específica y muy cuidada, o bien utilizan procedimientos de puesta en obra singulares que implican especial atención en el proceso de ejecución.

En el primer grupo se encuentran todas las cimentaciones superficiales y los muros dentro de los elementos de contención. Este tipo de obras utiliza en general dosificaciones de hormigón



convencional, de acuerdo con los requisitos exigidos en la Instrucción EHE y el Código Técnico de la Edificación. En su ejecución se aplican métodos habituales de hormigonado: se utilizan cubas para el vertido o la colocación en algunos casos de hormigón bombeado, el hormigón se compacta por sistemas tradicionales de vibrado interno con aguja y se cura posteriormente de acuerdo a la normativa antes mencionada y a las reglas de buena práctica de aplicación.

En el grupo de cimentaciones especiales con hormigón prefabricado, se encuentran los pilotes prefabricados dentro de las cimentaciones profundas y las pantallas de tablestacas dentro de los elementos de contención. En su realización, los elementos de la cimentación se fabrican según procesos industriales, siendo colocados en obra mediante técnicas especiales de desplazamiento del terreno por vibración, o más frecuentemente por hincas o percusión con golpes de maza.

En el grupo de las cimentaciones especiales de hormigón in situ se encuentran, dentro de las cimentaciones profundas, los pilotes de hormigón in situ; y dentro de los elementos de contención, los muros-pantalla y las pantallas de pilotes. En los pilotes, a su vez, se contemplan tanto los pilotes de desplazamiento como los de extracción, descritos en el apartado "3. Cimentaciones profundas: pilotes". A efectos de la presente publicación, cuando se hable de "cimentaciones especiales" se sobreentenderá que se trata de aquéllas ejecutadas con hormigón in situ.

Las condiciones especiales de puesta en obra del hormigón in situ en cimentaciones especiales, generalmente con perforaciones profundas, bajo agua o fluido estabilizador, y con cuantías de armadura importantes, hacen que sea necesario exigir al hormigón y sus componentes una serie de características específicas que permitan garantizar la calidad del proceso y del producto terminado⁵.

La importancia en la selección de los materiales componentes y la dosificación del hormigón de estas cimentaciones, así como su correcta puesta en obra radica en el hecho de que se trata de obras en las que el hormigón no es inspeccionable durante la puesta en obra, y cuando lo es, como en el caso de las pantallas, queda descubierto cuando el hormigonado ha finalizado. Así, si se han producido defectos en la dosificación del hormigón o la ejecución no se ha realizado correctamente, las patologías se detectan una vez completada la cimentación, siendo complejas y costosas las reparaciones necesarias para subsanarlas.

Esta publicación constituye un Estado del Arte sobre el hormigón in situ para cimentaciones especiales, en el cual se recogen los requisitos incluidos en la normativa de aplicación, alguna de reciente aparición, justificando y explicando su importancia y necesidad. También se incluyen otros aspectos que pueden contribuir a mejorar la calidad del hormigón de estas obras, que aunque no incluidos en la normativa, aparecen descritos en la bibliografía especializada o bien han sido extraídos de la experiencia práctica.

2.6 Bibliografía

- 1.- JIMÉNEZ SALAS, J.A.; DE JUSTO ALPAÑES, J.L. y SERRANO GONZÁLEZ, A.A. (1981) *Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del suelo y de las rocas*. Madrid: Ed. Rueda.
- 2.- LOZANO APOLO, G; LOZANO MARTÍNEZ-LUENGAS, A. (1998) *Curso diseño, cálculo, construcción y patología de cimentaciones y recalces*. Gijón. Ed. Lozano y Asociados, D.L.
- 3.- Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C. Seguridad estructural. Cimientos (2006).



- 4.- MUZÁS LABAD, F. (1988) Ejecución de pilotes in situ. En CEDEX *Curso sobre pilotajes y cimentaciones profundas*. Madrid.
- 5.- PRIETO TERCERO, L. *Recomendaciones sobre las características del hormigón a colocar en pantallas y pilotes mediante el procedimiento "tremie"*.
- 6.- MAROTE RAMOS, G. *Aspectos fundamentales de los materiales que intervienen en la ejecución de pantallas*. Jornada Técnica AETOS-AETESS "Pantallas en medio urbano para estructuras subterráneas". Madrid, 27 de septiembre de 2006.
- 7.- AENOR (2006). *Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Micropilotes. NORMA UNE-EN 14199*. Madrid: Ed. AENOR.



3. MATERIALES COMPONENTES Y SU DOSIFICACIÓN

3.1 Introducción

En este capítulo se describen las características necesarias que deben reunir los materiales componentes del hormigón (cemento, agua, áridos, aditivos y adiciones) y su dosificación para la construcción de pilotes hormigonados in situ y para muros-pantalla. En ambos casos, se va a partir de las prescripciones establecidas en la normativa de aplicación general a las estructuras de hormigón (EHE¹ y RC-08²), pero que debido a su carácter de tratados generales, no cubren aspectos específicos de estructuras que utilicen hormigones con características especiales, sistemas de hormigonado no convencionales, etc. Por ello, y para el caso de cimentaciones especiales se ha desarrollado una normativa UNE-EN que complementa a la anterior, y cubre los aspectos específicos de los hormigones utilizados en estas cimentaciones. Así, en este capítulo también se incluyen las indicaciones de aplicación recogidas en las normas UNE-EN correspondientes. Finalmente, se ha consultado normativa internacional específica para este tipo de estructuras, así como otras recomendaciones nacionales e internacionales, para completar la información disponible sobre los materiales componentes del hormigón para cimentaciones especiales y su dosificación.

Para la ejecución de pilotes perforados de hormigón, la norma de referencia en España es la EN 1536 ("Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Pilotes perforados")³. Esta norma es aplicable para la construcción de pilotes que se moldean en el terreno mediante excavación y que constituyen un elemento estructural para transmisión de cargas. Los pilotes pueden tener forma circular, casi circular o rectangular. Para la ejecución de muros-pantalla de hormigón, la norma de referencia en España es la EN 1538 ("Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Muros-pantalla")⁴.

El hormigón de estas estructuras debe tener unas características especiales que le permitan cumplir con las especificaciones de proyecto, a la vez que permitir su puesta en obra con facilidad. Los principales condicionantes de la colocación de estos hormigones son los siguientes⁸:

- Puesta en obra a través de tubería Tremie, de diámetro interior en general inferior a 300 mm.
- Profundidades de hormigonado altas, con la consecuente caída del hormigón por gravedad desde alturas elevadas, o mediante el uso de sistemas de bombeo (utilizado para el hormigonado de pilotes de barrena continua y pilotes de desplazamiento a rotación).
- Hormigonado en muchos casos bajo agua o lodo de perforación.
- Presencia de jaulas de armadura con espacios reducidos entre barras longitudinales y transversales.
- En algunos casos, largos tiempos de hormigonado, manteniendo la consistencia fluida del hormigón.

El hormigón adecuado a estos condicionantes de ejecución, debe tener por tanto una serie de propiedades⁵:

- No ser fácilmente segregable.
- Alta plasticidad y buena cohesión.
- Gran fluidez.
- Capacidad de cerrar sin precisar compactación.
- Gran trabajabilidad durante el proceso de vertido, incluida la retirada, en su caso, de entubados provisionales.

Los materiales utilizados para la fabricación del hormigón y su dosificación deben seleccionarse para obtener un hormigón que reúna estas propiedades, además de las propias de resistencia y durabilidad exigidas en el proyecto.

Dado que el hormigón preciso para cimentaciones especiales requiere unas características específicas que lo hacen diferente a otros tipos de hormigones estructurales, es necesario proceder a la realización de ensayos antes del inicio de las obras, con objeto de ajustar las dosificaciones apropiadas. Esta consideración es de gran importancia, y será desarrollada con mayor detalle en los apartados siguientes.

3.2 Cemento

3.2.1 Cementos adecuados

Con carácter general, la Instrucción EHE establece que podrán utilizarse en aplicaciones de hormigón armado, todos los cementos comunes recogidos en la vigente Instrucción para la Recepción de cementos. Adicionalmente, la Instrucción RC-08², en el Anejo 8, precisa que para cimentaciones de hormigón armado son muy adecuados los cementos comunes tipo CEM I y CEM II/A, siendo adecuados el resto de cementos comunes a excepción de los CEM III/B y los CEM IV/B. Además, tampoco recomienda los cementos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T y CEM II/B-T por no ser habituales en España.

Para el caso específico de cimentaciones especiales, las normas EN 1536 y EN 1538 establecen que el cemento tendrá que ser de los tipos siguientes^{3,4}:

- Cemento pórtland (CEM I).
- Cemento pórtland con escoria (CEM II/A-S y II/B-S). Son cementos en los que el porcentaje de escorias en peso está entre el 6 y el 35%.
- Cemento pórtland con humo de sílice (CEM II/A-D). Son cementos en los que el porcentaje de humo de sílice en peso está entre el 6 y el 10%.
- Cemento pórtland con puzolana (CEM II/A-P y II/B-P). Son cementos en los que el porcentaje de puzolanas naturales en peso está entre el 6 y el 35%.
- Cemento pórtland con cenizas volantes (CEM II/A-V y II/B-V). Son cementos en los que el porcentaje de cenizas volantes (silíceas) en peso está entre el 6 y el 35%.
- Cemento pórtland con esquistos calcinados (CEM II/A-T y II/B-T). Son cementos en los que el porcentaje de esquistos calcinados en peso está entre el 6 y el 35%. Tal como se ha comentado con anterioridad, estos cementos no son recomendados por la Instrucción RC-08 por no ser habituales en España.
- Cemento pórtland con caliza (CEM II/A-LL). Son cementos en los que el porcentaje de caliza en peso está entre el 6 y el 20%.
- Cemento pórtland mixto (CEM II/A-M (S-V) y II/B-M (S-V)). Son cementos en los que el porcentaje de adiciones en peso está entre el 6 y el 35%.
- Cemento de alto horno (CEM III/A, III/B y III/C). Son cementos en los que el porcentaje de escorias en peso está entre el 36 y el 95%.



Pueden emplearse otros cementos cuando fueran especificados y de eficacia probada en condiciones determinadas*. Así, los cementos CEM IV y CEM V con contenidos elevados de adiciones puzolánicas, suelen presentar propiedades similares a los cementos CEM III con escorias. En todo caso, no se utilizará cemento aluminoso.

Es preferible la utilización de cementos con adiciones (tipo II) porque está comprobado que éstas son especialmente beneficiosas para conseguir un hormigón con las propiedades adecuadas para cimentaciones especiales, tales como mejora de la trabajabilidad, de la durabilidad, retraso del fraguado del cemento y reducción de generación de calor durante la hidratación (para el caso de adición de cenizas volantes) o la mejora de la durabilidad y de la resistencia (para el caso del humo de sílice)^{3,5,14}.

Los cementos Pórtland tipo CEM II contienen una cierta proporción de adiciones minerales (escorias, humo de sílice o cenizas volantes), nunca superior al 35%, que modifican sus propiedades en el sentido comentado anteriormente, especialmente en el caso de la subclase B, que admite los mayores contenidos de adición.

En los cementos tipo CEM III el contenido de escorias siempre es superior al 35% pudiendo llegar hasta el 95%, y por lo tanto las propiedades anteriormente citadas se modifican de manera más acusada que en el cemento pórtland normal: el calor desarrollado en la hidratación es considerablemente menor; la velocidad de hidratación es más lenta, así como el desarrollo de resistencias (las resistencias hasta los 28 días pueden ser inferiores, aunque a largas edades llegan a superar las de los cementos pórtland); presentan una buena resistencia a los sulfatos; requieren más agua de amasado, así como un curado húmedo más cuidado y prolongado¹⁸. En este sentido, el "Anejo 4. Recomendaciones para la selección del tipo de cemento a emplear en hormigones estructurales" de la Instrucción EHE, los señala como muy adecuados para su utilización en grandes volúmenes de hormigón, y los recomienda en ambientes agresivos (corrosión por cloruros, sulfatos, lixiviación, etc). Las mismas consideraciones podrían hacerse para los cementos CEM IV y CEM V.

Cada uno de estos tipos de cementos se dividen a su vez en seis clases en función de la resistencia nominal a los 28 días, las cuales deben cumplir una serie de prescripciones mecánicas, físicas y químicas establecidas por la Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08², que se resumen a continuación.

* La Federal Highway Administration⁷ señala la posibilidad de utilizar para la construcción de pilotes en algunos casos cemento expansivo. En estos cementos, se forman cristales de etringita expansiva tras endurecer el hormigón; habitualmente esta expansión provocaría la fisuración incontrolada del hormigón y pérdida de resistencia. Sin embargo, en pilotes situados en roca o suelo duro, la armadura transversal y el terreno resisten esta expansión, reduciéndose la fisuración del hormigón y, por lo tanto, su pérdida de resistencia; al mismo tiempo, aumentan las tensiones en el contacto entre el hormigón y el terreno, lo que incrementa la resistencia por fuste del pilote.

Tabla 1.- Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes

Clase de resistencia (1)	Resistencia a compresión (N/mm ²), según UNE-EN 196-1				Tiempo de fraguado, UNE-EN 196-3		Estabilidad de volumen, UNE-EN 196-3
	Resistencia inicial		Resistencia nominal		Inicio a (minutos)	Final a (horas)	Expansión a (mm)
	2 días	7 días	28 días				
32,5N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10
32,5R	≥ 10,0	-					
42,5N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60		
42,5R	≥ 20,0	-					
52,5N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45		
52,5R	≥ 30,0						

(1) R = alta resistencia inicial; N = resistencia inicial normal.

Tabla 2.- Prescripciones químicas de los cementos comunes

Característica	Norma de ensayo	Cemento	Resistencia	Prescripción
Pérdida por calcinación	UNE-EN 196-2	CEM I, CEM III	Todas	≤ 5,0%
Residuo insoluble	UNE-EN 196-2	CEM I, CEM III	Todas	≤ 5,0%
Contenido de sulfatos (SO ₃)	UNE-EN 196-2	CEM I, CEM II	32,5 N; 32,5 R; 42,5 N	≤ 3,5%
			42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	≤ 4,0%
		CEM III (2)	Todas	
Contenido de cloruros (Cl ⁻)	UNE-EN 196-2	Todos (3)	Todas	≤ 0,10%

(1) Expresado en porcentaje de la masa del cemento final.

(2) El cemento CEM III/C puede contener hasta el 4,5% de sulfato.

(3) El cemento CEM III puede contener más del 0,10% de cloruros, pero hay que consignar el contenido real.



CEDEX

Además, las adiciones minerales utilizadas en la fabricación de estos cementos deben cumplir una serie de prescripciones²:

- La escoria granulada de horno alto debe estar constituida al menos en dos tercios de su masa por la suma de óxido de calcio, óxido de magnesio y dióxido de silicio. La relación en masa $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ será superior a 1,0.
- El humo de sílice cumplirá que la pérdida por calcinación no supere el 4% en masa, determinada conforme a UNE-EN 196-2, pero empleando un tiempo de calcinación de 1 h, y la superficie específica (BET) del humo de sílice sin tratar será al menos de 15,0 m²/g, determinada conforme a ISO 9277.
- En las cenizas volantes silíceas, la proporción de óxido de calcio reactivo será menor del 10% en masa, y el contenido de óxido de calcio libre, determinado por el método descrito en UNE-EN 451-1, no excederá del 1% en masa; las cenizas volantes que tiene un contenido de óxido de calcio libre superior al 1% en masa pero inferior al 2,5% en masa son también aceptables con la condición de que el requisito de expansión (estabilidad) no sobrepase los 10 mm cuando sea ensayada conforme a la norma UNE-EN 196-3, usando una mezcla de un 30% en masa de ceniza volante silícea y un 70% en masa de un cemento tipo CEM I. El contenido de dióxido de silicio reactivo no será inferior al 25% en masa.

Por último, en el caso del filler calizo utilizado como adición del cemento, la Instrucción RC-08 establece los siguientes requisitos para las calizas²:

- El contenido de carbonato de calcio, calculado a partir del contenido de óxido de calcio, no debe ser inferior al 75% en masa.
- El contenido de arcilla, determinado por el método del azul de metileno conforme a UNE-EN 933-9 debe ser menor de 1,20 g/100 g. Para este ensayo, la caliza debe estar molida a una finura aproximada de 5.000 cm²/g, determinada como superficie específica conforme a UNE-EN 196-6.
- El contenido de carbono orgánico total, determinado conforme a UNE-EN 13639, debe cumplir uno de los siguientes criterios:
 - a) Para el filler de los subtipos LL: no debe exceder del 0,20% en masa.
 - b) Para el filler de los subtipos L: no debe exceder del 0,50% en masa.

3.2.2 Recomendaciones adicionales

La Instrucción RC-08² (en su Artículo 10, "Uso de los cementos") recomienda expresamente utilizar el cemento de la menor clase resistente compatible con la resistencia mecánica del hormigón deseada.

Asimismo, para grandes volúmenes de hormigón armado, se indica² que resultan muy adecuados los cementos comunes CEM III/B y CEM IV/B y adecuados los cementos comunes tipo CEM II/B, CEM III/A, CEM IV/A y CEM V/A. También considera muy recomendable la característica adicional de bajo calor de hidratación (LH) y de muy bajo calor de hidratación (VLH), según los casos.

Para hormigonado en tiempo caluroso, se recomiendan² los cementos comunes tipo CEM II, CEM III/A, CEM IV/A y CEM V/A.

En todo caso, se hace hincapié en que es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia a sulfatos (SR) o al agua de mar (MR), cuando corresponda².

Otro aspecto a considerar, es que los cementos de categoría 32,5 por su menor finura de molido, suelen presentar también fraguados más lentos, aspecto favorable para su aplicación en cimentaciones especiales. Asimismo, para alcanzar las características mecánicas del hormigón exigidas en proyecto con un cemento de categoría resistente 32,5; será necesaria una dosificación más elevada de cemento, lo cual también resulta una condición favorable para el hormigón de este tipo de obras, que precisa un elevado contenido de finos. Por todo ello y para el caso de hormigón de cimentaciones especiales se consideran más adecuadas las clases resistentes 32,5 N y 32,5 R.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que los cementos de clases resistentes elevadas suelen presentar mayor finura de molido, por lo que si bien reducen la exudación, también presentan un fraguado más rápido y un notable aumento de la temperatura interna del hormigón debido a su elevado calor de hidratación¹⁴. Otro aspecto negativo es que la mayor finura de los cementos de elevada resistencia exige el empleo de una mayor cantidad de superplastificante para conseguir una buena dispersión de las partículas de cemento¹⁶. Estas son razones adicionales a las ya expuestas para desaconsejarlos en cimentaciones especiales, y recomendar a cambio la utilización de cementos 32,5, ya que en este tipo de obras es habitual emplear altas dosificaciones de cemento que pueden hacer especialmente graves los inconvenientes citados^{5,6}.

3.3 Agua

Según la Instrucción EHE¹, el agua que se utilice, 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 frente a la corrosión. En general, pueden emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica. Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, deben analizarse las aguas y cumplir las siguientes condiciones:

- Exponente de hidrógeno pH: ≥ 5
- Sustancias disueltas $\leq 15 \text{ gr/l}$
- Sulfatos, expresados en $\text{SO}_4^{=}$ $\leq 1 \text{ gr/l}$ (5 gr/l para el cemento SR)
- Ión cloruro, Cl^-
 - Para hormigón pretensado $\leq 1 \text{ gr/l}$
 - Para hormigón armado u hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración $\leq 3 \text{ gr/l}$
- Hidratos de carbono 0
- Sustancias orgánicas solubles en éter $\leq 15 \text{ gr/l}$



Estas prescripciones son necesarias por el perjuicio que algunas sustancias pueden causar a las propiedades del hormigón. La calidad del agua de amasado puede afectar al tiempo de fraguado, desarrollo de resistencias y a la corrosión de las armaduras¹⁴:

- Las aguas naturales que son ligeramente ácidas suelen ser inocuas, pero el agua que contiene ácido húmico y otros ácidos orgánicos puede alterar el endurecimiento del hormigón. Asimismo, las aguas muy alcalinas pueden también afectar al comportamiento del hormigón.
- El pH más adecuado para el agua de amasado se encuentra entre 6 y 8. El valor inferior se prescribe no como consecuencia del hidrógeno (que puede neutralizarse añadiendo cal) sino más bien a causa de los aniones asociados tales como el cloro o el sulfato. Además un valor demasiado bajo del pH puede tener efectos perjudiciales en la salud de los trabajadores. Puede realizarse una comprobación rápida de la calidad del agua mediante la determinación de su pH, que debe situarse en la franja 6-8; si no está dentro de estos límites, se debería realizar un análisis más completo del agua.
- El contenido de sulfatos debe estar limitado, ya que se puede producir etringita expansiva una vez endurecida la pasta de cemento hidratado.
- El agua que contiene una elevada cantidad de cloruros (por ejemplo el agua de mar), produce la corrosión de las armaduras, por lo que no debe ser utilizada como agua de amasado.
- Los hidratos de carbono (azúcares como glucosa, sacarosa, etc) incluso en pequeñas cantidades retrasan el fraguado del cemento, y por tanto la ganancia de resistencias a cortas edades. Si la cantidad es muy baja, las resistencias a largas edades no se ven afectadas, e incluso pueden mejorar. Cantidades apreciables de azúcar pueden afectar severamente la resistencia a los 28 días y edades posteriores.
- Las sustancias orgánicas que se disuelven en éter son grasas y aceites, cuya presencia interfiere la hidratación del cemento, y afectan negativamente a la ganancia de resistencias.
- Algunas aguas pueden contener limo o partículas de arcilla en suspensión. Estas partículas muy finas pueden afectar a la adherencia pasta-árido. Su efecto sobre la resistencia a compresión es pequeña, pero suelen aumentar la demanda de agua. La utilización de balsas de decantación reduce su contenido.
- La presencia de algas puede ocluir aire, con la consecuente reducción de resistencia, aunque tampoco se dispone de muchos datos al respecto. Asimismo se consideran perjudiciales por la disminución de la adherencia de la pasta de cemento a los áridos, por su influencia química coloidal en el endurecimiento, y por la formación de poros en el hormigón, debido a las propiedades jabonosas y superficiales de las algas.

3.4 Áridos

3.4.1 Prescripciones generales

Según la Instrucción EHE¹, los áridos que se vayan a utilizar para fabricar un hormigón estructural deben cumplir una serie de condiciones, que a continuación se detallan:

3.4.1.1 Condiciones físico-químicas

La cantidad de sustancias perjudiciales que pueden presentar los áridos no deben exceder de los límites indicados en la siguiente tabla¹:

Tabla 3.- Limitaciones a las sustancias perjudiciales.

SUSTANCIAS PERJUDICIALES		Cantidad máxima en % del peso total de la muestra	
		Árido fino	Árido grueso
Terrones de arcilla, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE 7133:58		1,00	0,25
Material retenido por el tamiz 0,063 UNE EN 933-2y que flota en un líquido de peso específico 2, determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE-EN 1744-1		0,50	1,00
Cloruros expresados en Cl ⁻ y referidos al árido seco, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1744-1	Hormigón armado u hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración	0,05	0,05
	Hormigón pretensado	0,03	0,03

En cuanto a la presencia de sulfatos y compuestos totales de azufre, las limitaciones son:

- Compuestos totales de azufre: 1%, expresado como S en % del peso total de la muestra de árido (en escorias de alto horno enfriadas por aire, 2%).
- Sulfatos solubles en ácidos: 0,8%, expresado como SO₃ en % del peso total de la muestra de árido (en escorias de alto horno enfriadas por aire, 1%).
- La Instrucción recomienda no utilizar áridos en los que la diferencia entre compuestos totales de azufre y sulfatos solubles (ambos expresados como SO₃) sea superior al 0,25%. Esta recomendación implica limitar en la práctica los compuestos totales de azufre al 1,05%, expresado como SO₃ en % del peso total de la muestra de árido.
- En el caso de que se detecte la presencia de sulfuros de hierro oxidables en forma de pirrotina, el contenido total de azufre será inferior al 0,1%⁶.
-

Además no se deben utilizar aquellos áridos finos que presenten una proporción de materia orgánica tal que, ensayados con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1744-1:99, produzcan un color más oscuro que el de la sustancia patrón¹.

Tampoco se deben utilizar áridos finos cuyo equivalente de arena, sobre la fracción 0/4, de conformidad con el Anexo A de la norma UNE-EN 933-8 sea inferior a¹:

- 70, para obras sometidas a la clase general de exposición I, IIa ó IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición, según el art. 8 de la EHE.
- 75, el resto de los casos.



No obstante lo anterior, aquellas arenas procedentes del machaqueo de rocas calizas o dolomías, entendiéndose como tales aquellas rocas sedimentarias carbonáticas que contienen al menos un 70% de calcita, dolomita o de ambas, que no cumplan la especificación del equivalente de arena, pueden ser aceptadas como válidas siempre que el valor de azul de metileno (UNE EN 933-9) sea igual o inferior a 0,60 gramos de azul por cada 100 gramos de finos de la fracción 0/2, para obras sometidas a clases generales de exposición I, IIa ó IIb y que no estén sometidas a ninguna clase específica de exposición, o bien igual o inferior a 0,30 gramos de azul por cada 100 gramos de finos de la fracción 0/2 para los restantes casos.

También hay que garantizar que los áridos no presentan reactividad potencial con los alcalinos del hormigón (procedentes del cemento o de otros componentes). Para su comprobación se realiza, en primer lugar, un estudio petrográfico, del cual se obtiene información sobre el tipo de reactividad que, en su caso, puedan presentar (álcali-sílice o álcali-carbonato).

Si del estudio petrográfico del árido se deduce la posibilidad de que presente reactividad álcali-sílice o álcali-silicato, se debe realizar el ensayo descrito en la UNE 146508:99 EX (método acelerado en probetas de mortero), para comprobar definitivamente si el árido es o no reactivo.

Si del estudio petrográfico del árido se deduce la posibilidad de que presente reactividad álcali-carbonato, se debe realizar el ensayo descrito en la UNE 146507:99 EX Parte 2 (determinación de la reactividad álcali-carbonato), igualmente para comprobar definitivamente si el árido es o no reactivo.

Si a partir de los resultados de algunos de los ensayos prescritos para determinar la reactividad se deduce que el material es potencialmente reactivo, el árido no se puede utilizar en condiciones favorables al desarrollo de la reacción álcali-árido (ver Capítulo 6. Durabilidad). En otros casos, se puede emplear el árido calificado a priori como potencialmente reactivo sólo si son satisfactorios los resultados del ensayo de reactividad potencial a largo plazo sobre prismas de hormigón, según UNE 146509 EX, presentando una expansión al finalizar el ensayo menor o igual al 0,04%.

3.4.1.2 Condiciones físico-mecánicas.

Los áridos deben cumplir las siguientes limitaciones¹:

- Friabilidad de la arena ≤ 40 . Determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE 83115:98 EX (ensayo micro-Deval).
- Resistencia al desgaste de la grava ≤ 40 . Determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE EN 1097-2:99 (ensayo de Los Ángeles).
- Absorción de agua por los áridos $\leq 5\%$. Determinada con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE-EN 1097-6.

3.4.1.3 Granulometría y forma del árido:

La cantidad de finos que pasan por el tamiz 0,063 UNE EN 933-2:96, expresada en porcentaje del peso total de la muestra, no debe exceder los valores de la siguiente tabla¹:

Tabla 4.- Contenido máximo de finos en el árido

ÁRIDO	PORCENTAJE MÁXIMO QUE PASA POR EL TAMIZ 0,063 mm	TIPOS DE ÁRIDOS
Grueso	1,5%	- Cualquiera
Fino	6%	- Áridos redondeados - Áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien a alguna clase específica de exposición
	10%	- Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición IIIa, IIIb, IIIc, IV o bien a alguna clase específica de exposición - Áridos de machaqueo no calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa o IIb y no sometidas a ninguna clase específica de exposición
	16%	- Áridos de machaqueo calizos para obras sometidas a las clases generales de exposición I, IIa o IIb y no sometidas a ninguna clase específica de exposición

La curva granulométrica del árido fino debe estar comprendida dentro del huso definido en la Tabla 5. Las arenas que no cumplan con las limitaciones establecidas en este huso pueden utilizarse en hormigones si se justifica experimentalmente que las propiedades relevantes de éstos son, al menos, iguales que las de los hormigones hechos con los mismos componentes, pero sustituyendo la arena por una que cumpla el huso¹.

Tabla 5.- Huso granulométrico del árido fino

Límites	Material retenido acumulado, en % en peso, en los tamices						
	4 mm	2 mm	1 mm	0,5 mm	0,25 mm	0,125 mm	0,063 mm
Superior	0	4	16	40	70	77	(1)
Inferior	15	38	60	82	94	100	100

(1) 84, 90 ó 94%, en función de la tabla anterior.



El índice de lajas del árido grueso (según UNE EN 933-3:97) debe ser inferior a 35.

3.4.1.4 Tamaño máximo del árido:

La Instrucción EHE establece que el tamaño máximo del árido grueso debe ser menor que las dimensiones siguientes¹:

- a) 0,8 de la distancia horizontal libre entre vainas o armaduras que no formen grupo, o entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo mayor que 45° con la dirección de hormigonado.
- b) 1,25 de la distancia entre un borde de la pieza y una vaina o armadura que forme un ángulo no mayor que 45° con la dirección de hormigonado.
- c) 0,25 de la dimensión mínima de la pieza.

3.4.2 Prescripciones particulares

Los requisitos de los áridos recogidos en el apartado anterior y extraídos de la Instrucción EHE se exigen para garantizar la fabricación de un hormigón estructural con las características de proyecto. Para el caso del hormigón utilizado en cimentaciones especiales, que debe presentar las propiedades descritas en el apartado "1. Introducción", algunos de estos requisitos cobran especial importancia, ya que aspectos como el contenido de finos de los áridos, su forma y su granulometría tienen especial incidencia en la docilidad, fluidez y cohesión necesarias en este tipo de hormigón tal como se describe a continuación¹⁴.

Los finos de los áridos (partículas por debajo de 63 μm) aumentan la demanda de agua del hormigón, lo cual puede compensarse con la utilización de aditivos plastificantes o superplastificantes. A cambio, permiten conseguir mezclas dóciles y cohesivas, a la vez que reducen la exudación en el hormigón fresco¹⁴. Asimismo para conseguir una buena durabilidad del hormigón es necesario que tenga un contenido mínimo de finos que den un hormigón muy compacto¹⁶.

La forma de las partículas de grava afecta a la docilidad del hormigón (que se ve favorecida por la presencia de partículas redondeadas), a la formación de nidos de grava (propiciada por la presencia de partículas planas y aciculares), y al efecto sobre la exudación (el agua de exudación queda retenida por las partículas laminares afectando a la adherencia del árido y la pasta).

Los áridos rodados, especialmente el caso de la arena, permiten conseguir hormigones con mayor docilidad.

Asimismo, las propiedades granulométricas de los áridos pueden afectar a las propiedades del hormigón de la siguiente manera:

- Las granulometrías continuas proporcionan mezclas de hormigón fresco más dóciles.
- Las granulometrías discontinuas originan mezclas fácilmente segregables.
- Los tamaños máximos grandes pueden originar problemas de segregación, al haber partículas de gran tamaño que tienen tendencia a separarse.
- Los tamaños máximos pequeños obligan a utilizar altas dosificaciones de cemento.
- La granulometría de la arena tiene una gran influencia en la docilidad del hormigón. Las arenas finas demandan más agua, pero proporcionan mezclas dóciles por su elevado poder de lubricación en el hormigón fresco. Las arenas gruesas, precisan menos agua pero dan lugar a mezclas de baja docilidad, que se colocan con dificultad.

Estas consideraciones pueden ayudar a comprender la importancia de seleccionar áridos adecuados para la fabricación del hormigón de cimentaciones especiales, y justifican las recomendaciones que se dan sobre los mismos en los apartados siguientes.

3.4.3 Recomendaciones para la selección de los áridos para cimentaciones especiales

Es preferible el empleo de áridos rodados cuando la colocación del hormigón se realiza por medio de tubería Tremie^{3,6,16}. La FHA⁷ expresamente indica que no se recomienda el empleo de áridos ligeros.

En cuanto a la granulometría de los áridos a emplear, y a fin de evitar la segregación, la granulometría de los áridos debe ser continua^{4,11}. Aspectos adicionales sobre la granulometría, tales como el contenido de finos adecuado, serán tratados en el apartado "7. Dosificación".

El tamaño máximo del árido suele estar condicionado tanto por la separación entre armaduras, como por el sistema de puesta en obra, normalmente a través de tubería Tremie¹⁶. Así, la normativa española tanto para la ejecución de pilotes como de muros pantalla, establece que el tamaño máximo del árido no debe exceder de 32 mm o de $\frac{1}{4}$ de la separación entre barras longitudinales, debiéndose elegir la menor de ambas dimensiones^{3,4,9,11}.

En condiciones normales, se deberían utilizar preferiblemente tamaños máximos de árido de 25 mm si es rodado y de 20 mm si procede de machaqueo⁵; en este último caso se es más estricto debido a la pérdida de docilidad que ocasiona el árido de machaqueo. En este mismo sentido, la FHA⁷ indica que el tamaño máximo del árido viene condicionado porque el hormigón pueda caer desde una cierta altura al ser puesto en obra debiendo fluir libremente entre las armaduras, por lo que es conveniente reducir algo el tamaño máximo del árido empleado, que la FHA recomienda sea de 19 mm⁷.

En pilotes de barrena continua y de desplazamiento, en los que los hormigones son bombeados a través del fuste de los útiles de perforación, no se deberían permitir tamaños máximos de árido superiores a 20 mm en el caso de árido rodado y 12 mm para el árido de machaqueo.

3.5 ADITIVOS

3.5.1 Prescripciones generales

Aditivos son aquellas sustancias o productos que, incorporados al hormigón antes del amasado (o durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario) en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento¹.

Muchos de los aditivos químicos que se utilizan en el hormigón afectan favorablemente a diversas propiedades de éste, tanto en estado fresco como endurecido, lo que lleva a designarles como aditivos multifuncionales. En éstos, la modificación favorable que corresponde al efecto más importante, es la función principal y es la que identifica o da nombre al aditivo; la función secundaria de un aditivo es la modificación que, accesoriamente puede producir un aditivo de alguna o algunas propiedades del hormigón, independientemente de la que define la función principal. Por otro lado, se denomina efecto secundario de un aditivo a la modificación que, inevitablemente, puede producir un aditivo de alguna o algunas propiedades de un hormigón que no se requiere como función secundaria¹. En cualquier caso, siempre es



recomendable recabar información adicional del fabricante sobre los posibles efectos secundarios del aditivo en las propiedades del hormigón.

En este mismo sentido, la Instrucción EHE¹ expresamente indica que el comportamiento de los aditivos puede variar con las condiciones particulares de cada obra, tipo y dosificación de cemento, naturaleza de los áridos, etc., y que la efectividad del aditivo superplastificante con el cemento debe ser objeto de estudio en laboratorio para seleccionar el binomio aditivo-cemento más conveniente; al producirse cambios en el tiempo de principio y fin de fraguado por la incorporación de superplastificantes, es necesario realizar ensayos previos en laboratorio con cada aditivo y cemento a utilizar. Es importante conocer la cantidad de agua que lleva incorporado un aditivo para deducirla al agua de amasado.

Es recomendable realizar estos ensayos con los mismos materiales que van a ser utilizados en la obra, especialmente el cemento, ya que el comportamiento de un mismo aditivo con diferentes cementos (incluso pertenecientes al mismo tipo y categoría resistente) puede presentar variaciones. Por ello, cualquier cambio en el suministro de los materiales componentes del hormigón durante la obra, especialmente el caso del cemento, puede alterar el correcto funcionamiento del aditivo.

En la utilización de aditivos es muy importante respetar las dosis recomendadas por el fabricante, ya que la sobredosificación puede ocasionar un incremento importante de los efectos secundarios del aditivo tales como importantes retrasos de fraguado (incluso inhibición) o reducción notable de resistencias¹⁴.

En los documentos de origen, debe figurar¹ la designación del aditivo de acuerdo con lo indicado en la UNE EN 934-2¹⁵, así como el certificado de garantía del fabricante de que el producto satisface los requisitos prescritos en la citada norma, el intervalo de eficacia, proporción a emplear y su función principal.

3.5.2 Aditivos de aplicación en cimentaciones especiales

Los aditivos pueden ser empleados para dar una alta plasticidad a la mezcla, para evitar exudación, porosidad o segregación, para prolongar la trabajabilidad en la medida requerida por la duración del vertido, y para prever cualquier interrupción en el proceso de vertido^{3,4}.

Para garantizar^{3,4,11} las propiedades del hormigón y la calidad requerida en el proceso de colocación en cimentaciones especiales, pueden emplearse los aditivos siguientes*:

- Aditivos reductores del contenido de agua/plastificantes.
- Aditivos altamente reductores del contenido de agua/superplastificantes.
- Aditivos retardadores de fraguado.

* Existen además otros tipos de aditivos que se pueden utilizar en casos especiales, como por ejemplo agentes antibacterianos o anti-hongos, reductores de la reactividad álcali-árido, inhibidores de corrosión, para mejorar la adherencia y coadyuvantes de bombeo, pero salvo estos últimos de ayuda al bombeo, no se suelen utilizar en la construcción de pilotes⁷. Para mejorar la impermeabilidad del hormigón también se pueden utilizar aditivos hidrófugos, que disminuyen la capacidad de absorción capilar o la cantidad de agua que pasa a través de una masa saturada y sometida a un gradiente hidráulico¹⁸.

3.5.2.1 Plastificantes y superplastificantes

Los plastificantes y superplastificantes reducen la fricción entre las partículas de cemento hidratadas de la pasta de cemento fresca, y por lo tanto aumentan la trabajabilidad (disminuyen su consistencia) del hormigón fresco utilizando una cantidad de agua baja. Para conseguir los elevados asientos en el cono de Abrams necesarios en los hormigones para la construcción de cimentaciones especiales sin la utilización de aditivos, se necesitaría una relación agua/cemento superior a 0,55. Sin embargo, más de la mitad de este agua presente en la mezcla actúa sólo como lubricante de la pasta de cemento durante la puesta en obra del hormigón y no es necesaria para la hidratación del cemento; este exceso de agua produce una pasta de cemento hidratada con gran cantidad de poros, lo que supone un hormigón más permeable y con menor resistencia. Al emplear estos aditivos, la relación a/c puede reducirse por debajo de 0,55 si se utilizan superplastificantes, lo que ayuda a conseguir una pasta más densa y menos permeable, a la vez que se obtiene una fluidez excelente⁷.

Según la Instrucción EHE, los aditivos que modifiquen el comportamiento reológico del hormigón deben cumplir la UNE EN 934-2:98¹⁵. Dicha norma europea distingue entre aditivos plastificantes y superplastificantes en función de su capacidad para reducir la cantidad de agua necesaria para conseguir una misma consistencia y del incremento de resistencia alcanzado. Con el empleo de aditivos plastificantes se consiguen reducciones del contenido de agua necesaria superiores al 5% e incrementos de la resistencia a compresión (a 28 días) superiores al 10%; con los aditivos superplastificantes, la reducción de agua alcanzada es superior al 12% y el incremento de resistencia a compresión (a 28 días) superior al 15% (siempre con respecto al hormigón testigo).

Debido a esta capacidad de disminuir la relación a/c en la dosificación, manteniendo la misma consistencia estos aditivos también reciben el nombre de reductores de agua/plastificantes y reductores de agua de alta actividad/superplastificantes.

A continuación se detallan la función principal, secundaria y efecto secundario de ambos tipos de aditivos¹⁴.

- Aditivo reductor de agua/plastificante: Aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir el contenido en agua de un determinado hormigón, o que sin modificar el contenido en agua, aumenta el asiento, o produce ambos efectos a la vez. Como funciones secundarias estos aditivos reducen el riesgo de segregación, favorecen la cohesión y disminuyen la exudación. Asimismo su utilización consigue una hidratación del cemento más completa. Como efecto secundario se pueden originar retrasos de fraguado.
- Aditivo reductor de agua de alta actividad/superplastificante: Aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir fuertemente el contenido en agua de un determinado hormigón, o que sin modificar el contenido de agua, aumenta considerablemente el asiento, o produce ambos efectos a la vez. Como funciones secundarias se pueden citar las mismas de los plastificantes: mejora de la cohesión así como disminución de la exudación y la segregación. También favorecen una mejor hidratación del cemento. No suelen afectar al fraguado del cemento. Su actuación sobre la consistencia, sin embargo, puede ser limitada en el tiempo en función del cemento seleccionado, siendo el efecto más prolongado con cementos de bajo contenido de C₃A.

De acuerdo a lo anterior, tanto la función principal como la secundaria de estos aditivos resultan muy favorables en el caso de hormigón para cimentaciones especiales, lo cual los hace muy



recomendables en esta aplicación. Debido a la gran fluidez requerida en este tipo de hormigón, será más habitual la necesidad de utilizar aditivos superplastificantes.

En el caso de los aditivos superplastificantes, y como ya se ha comentado con anterioridad, el tiempo de actuación puede ser limitado, lo cual afectaría al vertido ocasionando una prematura rigidez de la masa y la segregación. Por ello, en caso de utilización, se debe asegurar que su dosificación no provoque estos efectos secundarios y mantenga unas condiciones adecuadas en la fluidez del hormigón durante el período completo del hormigonado de cada pilote⁵. Para comprobar su comportamiento, deben prepararse amasadas de prueba con la misma dosificación que la que se vaya a usar en el pilote, y realizar el ensayo de consistencia a la misma temperatura ambiente que vaya a existir al hormigonar el pilote⁷. Este tipo de ensayos deben realizarse antes del comienzo de la obra, como ensayos previos o característicos, de acuerdo con la Instrucción EHE. Asimismo, es recomendable que se realicen con los materiales de obra, especialmente el cemento que se vaya a utilizar, ya que el comportamiento de los aditivos está muy condicionado por este factor, como se ha comentado anteriormente.

También es necesario tener en cuenta que las mezclas en las que se han empleado superplastificantes para conseguir una determinada consistencia, requieren una mayor energía de compactación que aquellas otras en las que la baja consistencia se ha conseguido con el empleo de mayor cantidad de agua de amasado¹⁶. Esto es debido a que el comportamiento reológico de las mezclas obtenidas es diferente.

El efecto del aditivo superplastificante sobre la consistencia del hormigón tiene su máximo a los pocos minutos de efectuada la mezcla. A partir de este momento la consistencia va aumentando, estando relacionada la evolución con el contenido de C_3A del cemento. Contenidos inferiores al 8% de C_3A , generan menor cantidad de etringita, manteniendo más tiempo la consistencia. Como la duración del efecto fluidificante es siempre limitada, en algunos casos puede ser necesario la adición del superplastificante en dos partes: una que puede oscilar entre el 35 y 65% de la cantidad total al amasar el hormigón en planta, y el resto que se añadiría momentos antes de la puesta en obra. Existen actualmente superplastificantes que permiten su adición de una sola vez, y que mantiene su efectividad durante períodos superiores a 1 hora¹⁶. Los ensayos previos y característicos deben contemplar estudios específicos sobre el período de efectividad del aditivo seleccionado.

Asimismo, y dado que la incorporación de un aditivo superplastificante al hormigón puede alterar de forma significativa su tiempo de principio y fin de fraguado, es conveniente hacer un seguimiento de tiempos de fraguado para mezclas de un cemento dado con distintos aditivos dosificados en diversas proporciones¹⁶.

Finalmente, hay que señalar que los aditivos suelen llevar agua incorporada, por lo que es preciso determinar su cantidad para restarla al agua de amasado a utilizar¹⁴.

3.5.2.2 Retardadores

Los retardadores de fraguado podrían ser necesarios cuando el hormigón se pone en obra con temperatura ambiente alta, (por encima de los 27 °C), para reducir la pérdida de fluidez en el momento en el que se hormigona el pilote. También se usan para conseguir un tiempo suficiente de trabajo con el hormigón fluido. Como regla general, este tiempo debería ser de unas cuatro horas. Adicionalmente, son adecuados para elementos con grandes volúmenes de hormigón, al permitir la liberación del calor de hidratación del cemento de forma gradual en el tiempo y así evitar que éste alcance altas temperaturas.

El uso de un contenido excesivo de retardadores de fraguado puede mantener el hormigón fluido durante demasiado tiempo y puede afectar a su resistencia a largo plazo⁷. Por el contrario, cuando se utiliza el contenido adecuado, presenta como funciones secundarias el incremento de resistencias a largo plazo del hormigón (al conseguirse un proceso de hidratación lento y ordenado) y la disminución de la temperatura interna del hormigón (al distribuirse en el tiempo el calor generado en la hidratación del cemento). Como efecto secundario, el hormigón disminuye su resistencia a edades tempranas¹⁴.

Según la Instrucción EHE, los retardadores de fraguado deben¹ cumplir la UNE EN 934-2¹⁵. También es aconsejable realizar ensayos previos y/o característicos para comprobar el comportamiento antes del comienzo de la obra, y su efecto si se va a utilizar mezclado con otros aditivos.

3.5.2.3 Aceleradores

Los aceleradores de fraguado no aparecen expresamente mencionados entre los aditivos que pueden utilizarse para el hormigón de cimentaciones especiales in situ. Así, estos aditivos no se deberían utilizar en la fabricación de hormigones para pilotes, salvo en situaciones extraordinarias, como por ejemplo para minimizar la lixiviación del cemento cuando un tramo del pilote está situado en un estrato de suelo granular con corriente de agua circulando y no se puede emplear un encofrado que selle el estrato⁷. Los efectos secundarios que ocasionan son una disminución de las resistencias a 28 días y posteriores, un aumento de la temperatura interna del hormigón en las primeras horas (originada por la concentración en poco tiempo de la liberación del calor de hidratación del cemento) y ligeros aumentos de la retracción¹⁴.

En la utilización de aceleradores de fraguado, la Instrucción EHE expresamente indica que en hormigones armados o pretensados no podrá utilizarse como aditivo acelerador el cloruro cálcico. Los aceleradores de fraguado deben¹ cumplir los requisitos recogidos en la UNE EN 934-2¹⁵.

3.5.2.4 Aireantes

El uso de aditivos oclusores de aire se recoge en la Instrucción EHE¹ (artículo 37.3.3.) para garantizar la resistencia del hormigón estructural frente a la helada. Asimismo, la norma UNE EN 934-2¹⁵ recoge los requisitos que deben cumplir estos aditivos.

Por lo tanto, cuando la construcción de los pilotes se realiza en clima frío y el terreno que circunda la parte superior del pilote tiene que ser excavado después del hormigonado, se pueden emplear en el hormigón aditivos oclusores de aire (aireantes) para la parte de pilote expuesta a la acción de las heladas^{3,7}. Estos aditivos incorporan durante el amasado una cantidad controlada de pequeñas burbujas de aire, uniformemente repartidas, que permanecen después del endurecimiento. Como función principal, mejoran la resistencia del hormigón a los ciclos de hielo-deshielo y a la actuación de las sales fundentes¹⁴.

En todo caso, el empleo de aireantes no reduce la necesidad de proteger el hormigón fresco de las condiciones de helada durante la etapa inicial de hidratación, ya que pueden verse dañadas severamente la resistencia y durabilidad del hormigón¹³.



Estos aditivos tienen diversas funciones secundarias en el hormigón: mejoran la docilidad ya que las burbujas actúan como finos, asimismo se disminuye la exudación, la absorción capilar y la permeabilidad del hormigón al interceptar las burbujas los poros capilares¹⁴. Los aireantes también mejoran el bombeo del hormigón, para lo cual es necesario que el hormigón contenga al menos un 5% de aire ocluido⁷.

El aire ocluido por el aditivo, origina como efecto secundario un descenso en la resistencia del hormigón (un 4-6% de aire produce un descenso del 20%). Por otra parte, en la utilización de estos aditivos hay que tener en cuenta que su actuación se ve interferida por la presencia de cenizas volantes o de aditivos superplastificantes en el hormigón. En ambos casos suele ser necesario aumentar la dosis de aditivo aireante para lograr el nivel de aire ocluido deseado, para lo cual se recomienda la realización de ensayos previos.

3.6 ADICIONES MINERALES

3.6.1 Adiciones utilizables

Las adiciones son aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente que, finamente divididos, pueden ser añadidos al hormigón con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle características especiales. Como adiciones al hormigón en el momento de su fabricación, la Instrucción EHE sólo considera la utilización de cenizas volantes y humo de sílice¹.

Estas adiciones también pueden incorporarse al hormigón dentro de los cementos CEM II/A-D (para el humo de sílice) y CEM II/A-V y II/B-V (para la ceniza volante silíceas), de acuerdo con la Instrucción de Cementos RC-08 y según se detalló en el apartado "2.1.1. Cementos adecuados". Sin embargo, su incorporación directa al hormigón tiene la ventaja de poder fijar en la dosificación la cantidad de adición que se quiere incorporar, e incluso poder tenerla en cuenta en términos de resistencia y durabilidad en el proceso de dosificación a través del coeficiente de eficacia, tal como se explicará más adelante. A cambio, es necesario realizar un control adicional de la adición que se va a utilizar, para comprobar que se cumplen las especificaciones exigidas por la EHE y que se detallarán seguidamente.

En el caso concreto de la escoria de alto horno molida, al no permitir la Instrucción EHE su adición directa en la fabricación del hormigón, su utilización debería limitarse a seleccionar alguno de los cementos que la incorporan: CEM II/A-S, II/B-S, CEM III/A, III/B y III/C.

En este apartado se recogen las consideraciones referentes a la utilización de las adiciones cuando éstas se añaden directamente en la fabricación del hormigón, y por tanto según la Instrucción EHE sólo se contemplan las cenizas volantes y el humo de sílice.

Se entiende por ceniza volante el polvo fino de partículas principalmente de forma esférica y cristalina, procedente del carbón pulverizado quemado, que posee propiedades puzolánicas y que principalmente está compuesta de SiO_2 y Al_2O_3 ¹⁴.

El humo de sílice es un subproducto que se obtiene en el proceso de producción de silicio y ferrosilicio, originado en la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos eléctricos de arco. Se trata de una adición puzolánica, capaz de reaccionar con el hidróxido cálcico (por ejemplo el procedente de la hidratación del cemento Pórtland) a la temperatura ordinaria y en presencia de agua, dando lugar a productos de reacción similares a los originados en la hidratación del cemento, en particular tobermorita¹⁴.

3.6.2 Requisitos de utilización

La Instrucción EHE¹ prescribe que la cantidad máxima de cenizas volantes adicionadas no excederá del 35% del peso de cemento, mientras que la cantidad máxima de humo de sílice adicionado no excederá del 10% del peso de cemento. En cualquier caso, la cantidad mínima de cemento no podrá ser inferior a 250 kg/m³, para hormigón armado.

Además, para añadir estas adiciones directamente en el hormigón, la Instrucción exige la selección de un cemento tipo CEM I, necesario para garantizar la presencia de suficiente hidróxido cálcico procedente de la hidratación que permita la reacción puzolánica de la adición.

Cuando se utilizan adiciones en la fabricación del hormigón, se puede tener en cuenta su empleo a los efectos del cálculo del contenido de cemento y de la relación agua/cemento¹. A tales efectos, se sustituye el contenido de cemento C (kg/m³) por $C + KF$, así como la relación A/C por $A/(C + KF)$, siendo F (kg/m³) el contenido de adición y K el coeficiente de eficacia de la misma. En el caso de las cenizas volantes, se tomará un valor de K no superior a 0,20 si se emplea un cemento CEM I 32,5, ni superior a 0,40 en el caso de cementos CEM I con otras categorías resistentes superiores (la Dirección Facultativa puede admitir, bajo su responsabilidad, valores superiores del coeficiente de eficacia pero no mayores de 0,65, siempre que ello se deduzca como una estimación centrada en mediana del valor característico real, definido como el cuantil del 5% de la distribución de valores de K ; la estimación referida debe proceder de un estudio experimental que debe ser validado previamente por el correspondiente organismo certificador del hormigón, y que no sólo tenga en cuenta la resistencia, sino también el comportamiento frente a la agresividad específica del ambiente al que va a estar sometida la estructura); en el caso del humo de sílice, se tomará un valor de K no superior a 2, excepto en el caso de hormigones con relación agua/cemento mayor que 0,45 que vayan a estar sometidos a clases de exposición H o F, en cuyo caso para K se tomará un valor igual a 1.

Las cenizas volantes y el humo de sílice¹ no pueden contener elementos perjudiciales en cantidades tales que puedan afectar a la durabilidad del hormigón o causar fenómenos de corrosión de las armaduras. Las cenizas volantes además deben cumplir las siguientes especificaciones (UNE EN 450-1):

- Anhídrido sulfúrico (SO ₃), según la UNE EN 196-2	≤ 3,0%
- Cloruros (Cl ⁻), según la UNE-EN 196-2	≤ 0,10%
- Óxido de calcio libre, según la UNE EN 451-1	≤ 1%
- Pérdida al fuego, según la UNE-EN 196-2	≤ 5,0%
- Finura, según la UNE EN 451-1	
Cantidad retenida por el tamiz 45 µm	≤ 40%
- Índice de actividad, según la UNE EN 196-1 y la UNE-EN 450-1	
o A los 28 días	≥ 75%
o A los 90 días	≥ 85%
- Expansión por el método de las agujas de Le Chatelier, según la UNE EN 196-3	< 10 mm

La especificación relativa a la expansión sólo debe tenerse en cuenta si el contenido en óxido de calcio libre supera el 1% sin sobrepasar el 2,5%. Además, en el caso de emplear cenizas volantes como adición al hormigón, es imprescindible comprobar previamente que el hormigón que se va a suministrar, está en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido¹.



A su vez, el humo de sílice¹ debe cumplir las siguientes especificaciones:

- | | |
|---|---------|
| - Óxido de silicio (SiO ₂), según la UNE-EN 196-2 | ≥ 85% |
| - Cloruros (Cl ⁻), según la UNE-EN 196-2 | < 0,10% |
| - Pérdida al fuego, según la UNE-EN 196-2 | < 5% |
| - Índice de actividad, según la UNE-EN 13263-1 | > 100% |

3.6.3 Efectos sobre el hormigón

La ventaja de añadir materiales puzolánicos al cemento pórtland en el caso de hormigón para cimentaciones especiales son varias. Así, las cenizas volantes reducen el calor de hidratación, por lo que son especialmente recomendables en pilotes de diámetro grande y pantallas de gran espesor. También al producir cierto retraso en el fraguado del cemento, prolongan el tiempo en el que el hormigón aún se puede trabajar. En concreto, la utilización de la ceniza volante en el hormigón le confiere las siguientes características^{14,19}:

- En el hormigón fresco:
 - Pueden utilizarse como finos para complementar la granulometría de la arena.
 - Aumento del tiempo de fraguado.
 - Disminución de la demanda de agua.
 - Mejora de la docilidad.
 - Reducción de la segregación y exudación.
 - Reducción del calor de hidratación, si sustituyen una parte del cemento.
 - Mejora de la aptitud para el bombeo.
 - Interfieren la actuación de los aireantes, por lo que puede precisarse mayor dosificación de éstos.
- En el hormigón endurecido:
 - Retraso en el endurecimiento: menores resistencias iniciales.
 - Mayores resistencias a largo plazo.
 - El resto de propiedades mecánicas se ven influenciadas en función de la resistencia a compresión alcanzada.
 - Disminución de la permeabilidad.
 - Disminución de la reserva alcalina del hormigón para proteger las armaduras.
 - Disminución del riesgo de reacción álcali-sílice.

Asimismo, el humo de sílice confiere las siguientes características al hormigón^{14,20}:

- En el hormigón fresco:
 - Aumento de la demanda de agua.
 - Disminución de la exudación.
 - Aumento de la cohesión.

- En el hormigón endurecido:
 - Disminución de la permeabilidad, con la consiguiente mejora de la durabilidad.
 - Aumento de las características mecánicas: resistencia a compresión y tracción, módulo de elasticidad.
 - Color más oscuro.

3.6.4 Otras adiciones

Como ya se ha comentado con anterioridad, el empleo de escorias granuladas de horno alto como adición del hormigón no viene contemplado en la EHE, aunque sí lo está por la norma europea EN 1538, específica para pantallas.

La escoria granulada de horno alto² se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria fundida de composición adecuada, obtenida por la fusión del mineral de hierro en un horno alto y constituida al menos en dos tercios de su masa por escoria vítrea y que posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada. La escoria granulada de horno alto debe estar constituida al menos en dos tercios de su masa por la suma de óxido de calcio, óxido de magnesio y dióxido de silicio; el resto contiene óxido de aluminio junto con pequeñas cantidades de otros compuestos. La relación en masa $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ debe ser superior a 1,0. Además, el producto de los contenidos en porcentaje de calcio y aluminio, expresados como óxidos, no debe ser menor de 325²¹.

La norma española UNE 83480 EX, establece especificaciones adicionales que las escorias deben cumplir²¹:

- | | |
|---|-----------------------|
| - Pérdida por calcinación, según UNE 83489 | ≤ 3% |
| - Anhídrido sulfúrico (SO ₃), según UNE 83490 | ≤ 4% |
| - Sulfuros (S ⁻²), según UNE 83491 | ≤ 2% |
| - Cloruros (Cl ⁻), según UNE 83492 | ≤ 0,1% |
| - Óxido de magnesio (MgO), según UNE 83496 | ≤ 14% |
| - Óxido de manganeso (MnO), según UNE 83497 | ≤ 4% |
| - Índice de actividad hidráulica, según UNE 83498 | |
| o Método de referencia | ≥ 8 N/mm ² |
| o Método acelerado | ≥ 4 N/mm ² |
| - Humedad, según UNE 83488 | ≤ 2% |
| - Adicionalmente, según el grado de finura (UNE 83484) | |
| Escoria molida F1 | |
| Cantidad retenida por el tamiz 200 µm | 0% |
| Cantidad retenida por el tamiz 90 µm | ≤ 10% |
| Cantidad retenida por el tamiz 45 µm | ≤ 30% |
| Escoria molida F2 | |
| Cantidad retenida por el tamiz 90 µm | 0% |
| Cantidad retenida por el tamiz 63 µm | ≤ 5% |
| Cantidad retenida por el tamiz 45 µm | ≤ 20% |
| - Índice de actividad resistente, según UNE 83485 | |



CEDEX

- o A los 28 días > 70%
- Principio y final de fraguado, según UNE 83486
 - o Principio de fraguado ≥ 60 min
 - o Final de fraguado ≤ 12 h
- Expansión por el método de las agujas de Le Chatelier, según UNE 83487 ≤ 10 mm

En la norma UNE 83481²³ se establecen los porcentajes máximos de escorias molidas a añadir, según el tipo de hormigón o mortero, para cemento tipo CEM I, con el criterio de partida de que dicha cantidad máxima de escoria molida añadida no debe reducir la proporción de clínker en la mezcla a límites inferiores de los permitidos a los cementos tipo CEM III/B para hormigón en masa y CEM III/A para hormigón armado. Los valores máximos establecidos son los siguientes, expresados en tanto por ciento de la suma del cemento y la escoria:

Hormigón en masa	Hormigón armado	Mortero
70%	50%	70%

También en dicha norma UNE 83481²³ se indica que las escorias molidas con finura tipo F2 se deben utilizar cuando el hormigón se encuentre en ambientes especialmente agresivos o los áridos sean potencialmente reactivos con los áridos, mientras que las escorias con finura tipo F1 son más apropiadas para hormigones situados en ambientes con una agresividad intermedia.

La utilización de escorias en el hormigón le confiere las siguientes características¹⁸:

- En el hormigón fresco:
 - Aumento del tiempo de fraguado.
 - Aumento de la demanda de agua.
 - Necesidad de un curado húmedo más cuidado y prolongado.
 - Reducción del calor de hidratación, si sustituyen una parte del cemento.
 - Interfieren la actuación de los aireantes, por lo que puede precisarse mayor dosificación de éstos.
- En el hormigón endurecido:
 - Retraso en el endurecimiento: menores resistencias iniciales.
 - Mayores resistencias a largo plazo.
 - Mayores valores de la fluencia.
 - Mayor resistencia a los sulfatos y al agua de mar.
 - Disminución de la reserva alcalina del hormigón para proteger las armaduras.
 - Disminución del riesgo de reacción álcali-sílice.

3.7 Dosificación del hormigón

3.7.1 Aspectos generales

La dosificación del hormigón consiste en determinar las cantidades en que deben mezclarse los componentes para obtener la consistencia adecuada a los medios de compactación que se emplearán en obra, así como la resistencia exigida en el proyecto. Adicionalmente, la dosificación debe garantizar una durabilidad adecuada del hormigón durante su vida de servicio.

En el caso de cimentaciones especiales, la dosificación ajustada debe proporcionar un hormigón capaz de fluir, rellenando cualquier parte del pilote o muro-pantalla, pasando a través de las armaduras por la simple acción de su propio peso, en general sin ningún otro método de compactación; sin segregarse ni quedar bloqueado en las armaduras, lo que originaría defectos importantes como: bolsas, coqueras, juntas, falta de continuidad, etc¹⁸. Se debe poder bombear, verter o colocar mediante tubería Tremie por gravedad hasta el fondo de la excavación y debe desplazar los lodos bentónicos o el agua al ascender por la perforación⁷. Para ello, debe poseer alta plasticidad y buena cohesión, buena fluidez, capacidad de autocompactación y suficiente trabajabilidad durante el proceso de vertido, incluida la retirada, en su caso, de entubados provisionales^{3,5}.

De acuerdo con lo anterior, la dosificación elegida debe conseguir un hormigón de gran docilidad en términos de fluidez y elevada cohesión. Con carácter general, estas propiedades pueden conseguirse utilizando una dosificación con alto contenido de cemento y de finos, contenidos elevados de arena y la utilización de aditivos plastificantes o superplastificantes.

El estudio de dosificación habitual en un hormigón estructural parte de los datos de resistencia, consistencia y durabilidad deseadas determinando los contenidos de cemento, agua, áridos y aditivos en su caso para conseguir dichas propiedades. En los párrafos siguientes se van a analizar los valores habituales de resistencia, consistencia y durabilidad del hormigón para cimentaciones especiales.

La Instrucción EHE establece como resistencia mínima en aplicaciones de hormigón armado la categoría HA25. La normativa europea indica que la resistencia de proyecto del hormigón para pilotes perforados estará comprendida entre las categorías C 20/25 y C 45/55. Se puede emplear un hormigón de resistencia más elevada, siempre y cuando esté especificado en proyecto y sea compatible con las condiciones de terreno y con el proceso constructivo^{3,5}.

En cuanto a la consistencia, los hormigones para cimentaciones especiales en general se colocan con consistencia muy fluida (asientos de cono superiores a 150 mm), lo cual obliga habitualmente a utilizar en la dosificación aditivos superplastificantes.

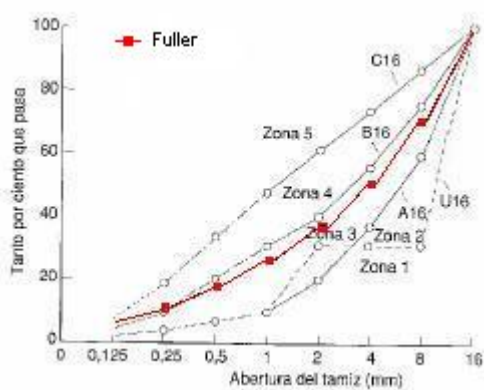
Finalmente, y en referencia a los condicionantes de durabilidad, en el caso de contacto con aguas o suelos agresivos, la Instrucción EHE fija requisitos al contenido mínimo de cemento y la máxima relación agua/cemento, los cuales se analizarán en detalle en el apartado "6. Durabilidad".

3.7.2 Ajuste granulométrico

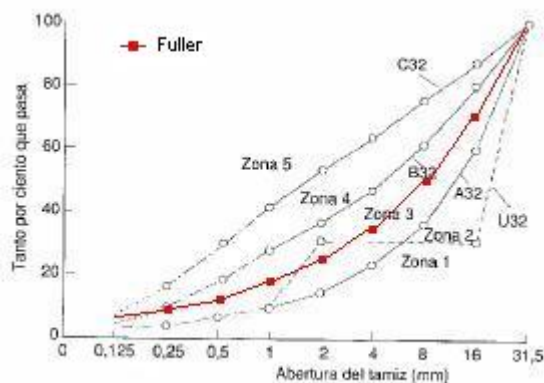
Un primer aspecto a considerar en el estudio de dosificación y al objeto de conseguir una mezcla sin riesgo de segregación, es primordial adoptar una granulometría del árido apropiada que tal como se detalló en el apartado "4. Áridos" debe ajustarse a una granulometría continua seleccionando asimismo gravas de tamaño máximo reducido.

En la dosificación de un hormigón para cimentaciones especiales, y en lo que se refiere a los ajustes granulométricos, son aplicables los métodos tradicionales que se utilizan en los hormigones convencionales, tales como el de Fuller, Bolomey, de la Peña, Faury, etc. En el caso de utilización de áridos de tamaño máximo 16 mm o inferiores, los métodos mencionados dan una cantidad de arena igual o superior al 50%; sin embargo, el método de Faury da dosificaciones con menos contenido de arena y menor demanda de agua, para una misma consistencia¹⁶.

Asimismo, para el ajuste granulométrico de los áridos, pueden ser útiles las recomendaciones al respecto recogidas en el Código Modelo del CEB-FIP²² donde se establecen distintos husos de granulometrías continuas para diferentes tamaños máximos, que se consideran adecuados para hormigones estructurales. En las gráficas siguientes, se muestran los correspondientes a tamaños máximos del árido de 16 y de 32 mm, entre los cuales se encuentran los tamaños habituales del árido utilizado en hormigón para cimentaciones especiales.



Ejemplos de husos granulométricos para un tamaño máximo del árido de 16 mm. En rojo, la curva de Fuller correspondiente.



Ejemplos de husos granulométricos para un tamaño máximo del árido de 32 mm. En rojo, la curva de Fuller correspondiente.

Con arenas rodadas, se recomiendan granulometrías en la zona 3, aunque puede ser también aceptable la zona 4. Los áridos en la zona 1 tienden a producir hormigones poco dóciles, que son difíciles de trabajar y tienden a la exudación; estas dificultades pueden minimizarse mezclando el árido con otros áridos disponibles, mediante el uso de aire ocluido o mediante adiciones. Los áridos de la zona 5 pueden requerir grandes cantidades de agua y en consecuencia elevados contenidos de cemento para una relación a/c fijada, para conseguir la resistencia. Con arenas y gravas de machaqueo, y a la hora de fijar la granulometría dentro de los husos favorables, hay que tener en cuenta que por su naturaleza originan hormigones menos dóciles.

Como se observa en las figuras anteriores, la curva de Fuller, de gran tradición de uso en nuestro país, encaja dentro del huso recomendado (zona 3), que sin embargo tiene la ventaja de proporcionar mayor flexibilidad en la utilización de otras curvas granulométricas posibles dentro del huso.

Finalmente, y en referencia a las proporciones granulométricas de los áridos, en el caso de un tamaño máximo de árido menor o igual a 32 mm, la mezcla debe^{4,11} presentar granulometría

continua y contenido ponderal de arena en los áridos superior al 40%. Este requisito se considera adecuado ya que las propiedades necesarias del hormigón fresco (fluidez, cohesión y docilidad) se ven favorecidas incorporando mayores proporciones de arena. En este mismo sentido, el ACI recomienda un porcentaje mínimo de arena del 43%¹³.

En los siguientes apartados se incluirán otras recomendaciones sobre la dosificación a utilizar que permitan obtener un hormigón con las características necesarias para cimentaciones especiales.

3.7.3 Recomendaciones de dosificación

3.7.3.1 Contenidos de cemento

Existe común acuerdo en que los hormigones para cimentaciones especiales deben incorporar una alta dosificación de cemento. De esta manera, se consigue un hormigón con alto contenido en finos, dócil y cohesivo y que cierra con facilidad sin compactación, alcanzando una alta densidad. Estos elevados contenidos de cemento permiten, asimismo, introducir una mayor cantidad de agua en la dosificación sin aumentar excesivamente la relación agua/cemento y de esta manera favorecen el conseguir la elevada fluidez necesaria en el hormigón.

La cantidad recomendada de cemento, siendo alta en todos los casos, varía de unas fuentes a otras. Así, según el PG3⁹, para pilotes perforados el contenido de cemento debe ser mayor de 350 kg/m³ y se recomienda utilizar al menos 400 kg/m³. El Código Técnico de la Edificación coincide con la norma EN 1536 en exigir en cimentaciones especiales, pero con requisitos distintos en función de si se hormigona bajo lodo o no, tal como se refleja en la Tabla 7^{3,5}:

Tabla 7.- Requisitos de dosificación

(Código Técnico de la Edificación y norma EN 1536)

Contenido de cemento	
- vertido en seco	≥ 325 kg/m ³
- hormigonado bajo agua o lodos de perforación	≥ 375 kg/m ³

Si no se obtienen mezclas de alta densidad se puede ajustar el contenido de cemento indicado en las tablas anteriores⁵. Una elevada densidad es indicativa de un hormigón de alta compacidad. El exigir un contenido superior de cemento en el caso de hormigonado bajo lodo o agua permite compensar efectos locales de lavado del cemento o contaminación con el lodo de perforación.

El contenido mínimo de cemento también está condicionado por el tamaño máximo de los áridos. Así, los tamaños máximos reducidos obligan a añadir más cemento, tal como se indica en la Tabla 10, para el caso de muros pantalla^{4,5}:



CEDEX

Tabla 10.- Contenido mínimo de cemento en función del tamaño máximo del árido
(Código Técnico de la Edificación y norma EN 1538)

Dimensión máxima de los áridos (mm)	Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)
32	350
25	370
20	385
16	400

Las referencias internacionales también recomiendan contenidos de cemento mínimos elevados para estos hormigones, aunque con ligeras variaciones ya que se tienen en cuenta otros aspectos como requisitos de durabilidad o tamaño máximo utilizado.

Así, el ACI, establece con carácter general que el contenido mínimo de cemento debería ser de 335 kg/m³ (390 kg/m³ en ambientes agresivos, como el marino) y también limita el contenido máximo¹³ a 445 kg/m³. Este es un aspecto importante, ya que contenidos excesivos de cemento pueden ocasionar un mayor calor de hidratación y una elevada retracción con riesgo en ambos casos de fisuración. Este aspecto también está contemplado por la Instrucción EHE que en su artículo 71.3.2.1 señala que contenidos superiores a 500 kg/m³ de cemento no deben utilizarse, salvo en casos excepcionales (en los que, como ocurre en ciertos casos de prefabricación, se cuidan y controlan al máximo todos los detalles relativos a los materiales, granulometrías, dosificación, ejecución y curado final) y previa justificación experimental y autorización expresa de la Dirección de Obra; aún en los casos excepcionales, no es aconsejable una dosificación de cemento superior a 500 kg/m³.

El análisis conjunto de todas las recomendaciones nacionales e internacionales indica que el contenido mínimo de cemento en cimentaciones especiales (pilotes y pantallas) suele fijarse alrededor de 350 kg/m³ siendo recomendable elevarlo en el caso de hormigonados bajo lodo o agua, en ambientes especialmente agresivos y cuando se utilizan tamaños máximos reducidos. En cualquier caso, es conveniente no superar los 450 kg/m³ de cemento para evitar efectos no deseados.

Finalmente, queda por añadir que la Instrucción EHE fija requisitos al contenido mínimo de cemento por condicionantes de durabilidad (ver Capítulo 6). Sin embargo, en el caso más extremo de ambiente agresivo estos valores se fijan para hormigón armado en un mínimo de 350 kg/m³ de cemento que, tal como ha quedado patente, se cumple e incluso se supera en la generalidad de los casos de cimentaciones especiales, debido a las elevadas dosificaciones de cemento habitualmente utilizadas condicionadas por la necesidad de obtener hormigones fluidos y cohesivos.

3.7.3.2 Relación agua/cemento

En cuanto a la relación agua/cemento máxima recomendada existe coincidencia en limitarla a 0,6 en cimentaciones especiales, para aquellas normas que así lo recogen: el Código Técnico de la Edificación y las normas EN 1536 y EN 1538 para el caso español. Sin embargo, al ser el hormigón de cimentaciones especiales un hormigón estructural, y sobre todo si se dosifica utilizando cementos de no muy elevada categoría resistente (32,5) como es recomendable, lo

habitual en la experiencia es ajustar dosificaciones con relaciones agua/cemento por debajo de este valor para poder alcanzar la resistencia de proyecto. Los valores habituales de relación a/c, así, suelen encontrarse entre 0,40 y 0,60⁶. Finalmente, señalar que para el caso de ambientes agresivos, la relación agua/cemento fijada debe cumplir los requisitos exigidos por la Instrucción EHE, y que se recogen en el capítulo "6. Durabilidad".

Es importante conocer la cantidad de agua que llevan incorporados los aditivos utilizados en la dosificación para deducirla del agua de amasado.

3.7.3.3 Contenido de finos

Otro aspecto particular en la dosificación del hormigón para estas aplicaciones, se encuentra en la necesidad de incorporar un elevado contenido de finos, que contribuyan a mejorar la docilidad y cohesión del hormigón. Una parte de estos finos los aporta el propio cemento y el resto la arena. Se vuelve a observar nuevamente en el estudio comparativo de la normativa variación en los requisitos recogidos en unas fuentes y otras. Así, el PG-3 y la norma EN 1538 de pantallas exigen una masa del conjunto de finos de la mezcla (comprendido el cemento y otros materiales finos) entre 400 y 550 kg/m³. Esta última especifica que se entiende como tales las partículas de dimensiones inferiores a 80 µm, incluido el cemento y otros finos. En cambio, la norma EN 1536 de pilotes establece requisitos específicos al contenido mínimo de finos según se recoge en la Tabla 8. Se observa en dicha tabla que el contenido de finos debe ser superior para el caso de utilizar grava de muy reducido tamaño máximo (≤ 8 mm) con el objetivo de garantizar la necesaria compacidad. Finalmente, el Código Técnico de la Edificación⁵ utiliza los mismos requisitos para el caso de pilotes (Tabla 8), pero establece que el contenido de finos para pantallas (entendiendo como tales las partículas de tamaño inferior a 0,125 mm, incluido el cemento) debe ser igual o superior a 450 kg/m³ para tamaños máximos de árido inferiores o iguales a 16 mm, y 400 kg/m³ para el resto de los casos.

Tabla 8.- Requisitos de dosificación: contenido de finos.

(Código Técnico de la Edificación y norma EN 1536)

Contenido de finos $d < 0,125$ mm (cemento incluido)	
- árido grueso $D_{\max} > 8$ mm	≥ 400 kg/m ³
- árido grueso $D_{\max} \leq 8$ mm	≥ 450 kg/m ³

En este aspecto es conveniente resaltar que la Instrucción EHE-08 indica que la cantidad total de finos en el hormigón¹, resultante de sumar el contenido de partículas del árido grueso y del árido fino que pasan por el tamiz UNE 0,063, la componente caliza, en su caso, del cemento, y los finos procedentes del eventual empleo de agua reciclada debe ser menor o igual que 175 kg/m³.

3.7.3.4 Dosificación de aditivos y adiciones

La dosificación de los aditivos depende del tipo de aditivo y de la marca comercial, y deben seguirse las recomendaciones del fabricante. La selección del tipo y contenido de aditivo, sin embargo, cobra particular importancia en los hormigones de cimentaciones especiales. Así, la



CEDEX

FHA⁷, establece que la dosificación del hormigón adoptada debe ser comprobada mediante un ensayo de evolución de la consistencia con el tiempo tras el amasado. Lo deseable es que la consistencia se reduzca lentamente y que aún sea superior a 100 mm a las cuatro horas del amasado; se ha escogido este periodo de cuatro horas porque es el máximo tiempo requerido en general para poner en obra el hormigón. Es importante realizar este ensayo de pérdida de consistencia a la misma temperatura ambiente que la real de trabajo (un aumento de temperatura de 10 °C incrementa la velocidad de pérdida de consistencia por un factor 2 aproximadamente)⁷.

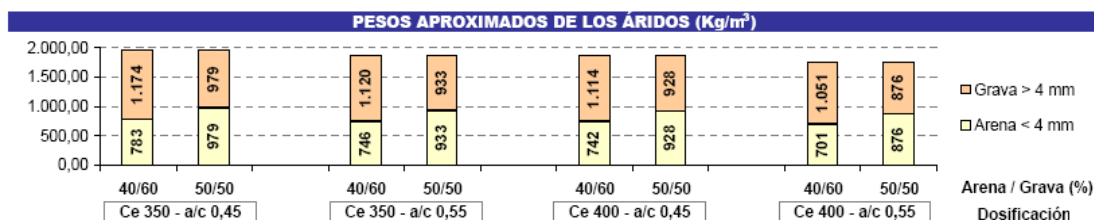
Finalmente y en cuanto a la dosificación de las adiciones minerales, la FHA⁷ recomienda sustituir un 15% de cemento por cenizas volantes o escorias, o un 7,5% de cemento por humo de sílice para reducir la exudación. En el apartado "6. Adiciones minerales" se han detallado las limitaciones al respecto contenidas en la Instrucción EHE en cuanto a los tipos de adición, contenidos máximos admitidos, otros requisitos adicionales y la posibilidad de contabilizar las adiciones en la dosificación a través de su coeficiente de eficacia.

3.7.3.5 Ejemplos de dosificación

En el siguiente gráfico⁸ se muestran los pesos aproximados de los áridos (en kg/m³), para los valores habituales de dosificación del hormigón de pantallas (ver Tabla 11), a modo de ejemplo y de forma orientativa.

Tabla 11.- Valores habituales de dosificación del hormigón de pantallas.

Contenido de cemento	350 – 400 kg/m ³
Relación a/c	0,45 – 0,55
Tamaño máximo del árido	20 – 25 mm
Consistencia	180 – 210 mm
Relación arena/total áridos (en peso)	0,40 – 0,50



3.7.4 Casos particulares de dosificación

Un caso particular de dosificación lo constituyen los pilotes primarios en pantallas de pilotes secantes en los que se puede emplear hormigón con clase de resistencia más baja o mortero³. Para estos pilotes primarios se suelen utilizar hormigones con una resistencia a compresión a 28

días por debajo de 3 N/mm², facilitando así la ejecución del solape entre pilotes. En este hormigón es habitual una concentración de cemento superior a 200 kg/m³, con relación agua/cemento por encima de 1. En los pilotes secundarios, por el contrario, se debe emplear un hormigón como el descrito para pilotes perforados⁸.

3.8 Bibliografía

- 1.- MINISTERIO DE FOMENTO (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 2.- MINISTERIO DE FOMENTO (2008). *Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 3.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Bored piles. PRE-NORMA prEN 1536:2008*.
- 4.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Diaphragm walls. PRE-NORMA prEN 1538:2008*.
- 5.- Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C. Seguridad estructural. Cimientos (2006).
- 6.- PRIETO TERCERO, L. Recomendaciones sobre las características del hormigón a colocar en pantallas y pilotes mediante el procedimiento "tremie". Disponible en <http://www.ciccp.es/default.asp?indice=669&dem=6>. (Consulta: mayo de 2007)
- 7.- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1999). *Drilled shafts: construction, procedures and design methods. Publication N° FHWA-IF-99-025*.
- 8.- MAROTE RAMOS, G. (2006) *Aspectos fundamentales de los materiales que intervienen en la ejecución de pantallas*. Jornada Técnica AETOS-AETESS "Pantallas en medio urbano para estructuras subterráneas". Madrid, 27 de septiembre de 2006.
- 9.- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (2002). Cimentaciones por pilotes de hormigón armado moldeados "in situ". En *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*.
- 10.- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1990). *Bored cast-in-place piles. Formation, design and bearing capacity. DIN 4014*. Berlín. Ed: DIN.
- 11.- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (2002). Pantallas continuas de hormigón armado moldeadas "in situ". En *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*.
- 12.- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1988). *Cast-in-situ concrete diaphragm walls. Design and construction. DIN 4126*. Berlín. Ed: DIN.
- 13.- ACI (2006c). Design, manufacture and installation of concrete piles. ACI 543R. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 6*. Detroit: Ed. American Concrete Institute.
- 14.- CALAVERA RUIZ, J.; ALAEJOS GUTIÉRREZ, P.; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J.; GONZÁLEZ VALLE, E. y RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (2004) *Ejecución y control de estructuras de hormigón*. Ed. INTEMAC. Madrid.



- 15.- AENOR (2002). *Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado. NORMA UNE-EN 934-2*. Madrid: Ed. AENOR.
- 16.- CEDEX. *Cimentaciones especiales. Materias primas y dosificación*. Informe del Laboratorio de Geotecnia.
- 17.- SOLA CASADO, P.R. (1988) Tipos especiales de pilotes: micropilotes, jet-grouting y elementos portantes. En CEDEX *Curso sobre pilotajes y cimentaciones profundas*. Madrid.
- 18.- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1989). *Hormigón*. Madrid: E.T.S. Ingenieros de Caminos.
- 19.- AENOR (2006). *Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. NORMA UNE-EN 450-1*. Madrid: Ed. AENOR.
- 20.- AENOR (2006). *Humo de sílice para hormigón. Parte 1: Definiciones, requisitos y criterios de conformidad. NORMA UNE-EN 13263-1*. Madrid: Ed. AENOR.
- 21.- AENOR (1996). *Adiciones al hormigón. Escorias granuladas molidas de horno alto. Definición, especificaciones, transporte y almacenamiento de las escorias granuladas molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados con cemento pórtland Tipo I. NORMA UNE 83480 EX*. Madrid: Ed. AENOR.
- 22.- GEHO-CEB (1995). *Código modelo CEB-FIP 1990 para hormigón estructural*. Madrid: Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- 23.- AENOR (1996). *Adiciones al hormigón. Escorias granuladas molidas de horno alto. Recomendaciones de uso para las escorias granuladas molidas utilizadas en los hormigones y morteros fabricados con cemento pórtland Tipo I. NORMA UNE 83481 EX*. Madrid: Ed. AENOR.

4. EJECUCIÓN DEL HORMIGONADO

4.1 Introducción

La colocación del hormigón requiere seleccionar el equipo adecuado según las condiciones de obra, así como tomar ciertas precauciones en el manejo del material para evitar su segregación, es decir, la separación de los constituyentes del hormigón, ocasionada por diferencias en el tamaño de las partículas de árido y en la densidad de los componentes¹.

El riesgo de segregación es mayor, y por tanto hay que extremar las precauciones durante el vertido, en las siguientes condiciones¹:

- Al utilizar consistencias extremas (fluidas o secas). Las consistencias fluidas, sobre todo si han sido obtenidas con un contenido excesivo de agua, originan una decantación de las partículas más gruesas al fondo de la masa. Con consistencias secas, los movimientos hacen que se despeguen los granos de mayor tamaño.
- Al emplear granulometrías discontinuas, que son especialmente susceptibles de segregar al faltar trabazón en el esqueleto granulométrico por haber una diferencia grande entre las partículas de mayor tamaño y las siguientes.
- Al utilizar un tamaño máximo elevado porque las partículas mayores se despegan fácilmente de la masa, con pequeños movimientos de ésta.
- Al utilizar arenas con muy pocos finos, o bajos contenidos de cemento, ya que la mezcla resulta poco dócil para su colocación.

De las consideraciones anteriores, tan sólo la utilización de consistencias fluidas es de aplicación al caso de las dosificaciones ajustadas para el hormigón de cimentaciones especiales. Incluso en este caso, la utilización de aditivos superplastificantes para conseguir estas consistencias las hace más cohesivas y reduce el riesgo de segregación. En general, y tal como ha quedado explicado en el capítulo anterior, la selección de los materiales y los criterios para la dosificación de estos hormigones, van encaminadas a conseguir mezclas cohesivas y por tanto que no segreguen con facilidad si la colocación se realiza correctamente.

En este capítulo se recogen las pautas para llevar a cabo una correcta ejecución del hormigonado, de modo que el hormigón puesto en obra reúna las características deseadas.

4.2 AMASADO

La Instrucción EHE recomienda para las aplicaciones estructurales el empleo de hormigón fabricado en central, ya que el producto obtenido presenta una mayor homogeneidad y uniformidad³. La central de fabricación de hormigón, dispone de un sistema implantado de control de producción, con almacenamiento de materias primas, sistema de dosificación, equipos de amasado, y en su caso, equipos de transporte².

Dicha central puede estar en obra o ser una central de hormigón preparado, en cualquier caso, sus instalaciones deben cumplir los requisitos recogidos por la Instrucción EHE. A continuación se recogen aquellos aspectos de mayor interés:



- El almacenamiento del cemento debe realizarse de forma que se evite su contaminación, en silos estancos que lo preserven de la humedad, o en sacos protegidos de la intemperie. El cemento no debe almacenarse prolongadamente ya que puede meterorizarse. Así, para la categoría 32,5 habitual en cimentaciones especiales, el período máximo recomendable de almacenamiento es de tres meses²⁰.
- Los áridos deben almacenarse sobre una base anticontaminante que evite su contacto con el terreno; la mezcla entre los apilamientos de fracciones granulométricas distintas se debe evitar con tabiques separadores o con espaciamientos amplios entre ellos.
- Si existen instalaciones para almacenamiento de agua o aditivos, deben ser tales que eviten cualquier contaminación. Los aditivos pulverulentos se deben almacenar en las mismas condiciones que los cementos. Los aditivos líquidos y los pulverulentos diluidos en agua se deben almacenar en depósitos protegidos de la helada y que dispongan de elementos agitadores para mantener los sólidos en suspensión.
- Las tolerancias de pesada para el cemento, adiciones, áridos y agua total son del $\pm 3\%$ y del $\pm 5\%$ para los aditivos. En el agua total debe considerarse la directamente añadida a la amasadora (medida con precisión $\pm 1\%$), el agua que pudiera quedar en la amasadora después de un lavado de la misma y la aportada por la humedad de los áridos (tanto de absorción como el agua superficial) y por los aditivos.

El amasado en central puede realizarse bien en amasadora fija (caso de central amasadora) o bien en amasadora móvil (caso de central dosificadora). Existe también la posibilidad de iniciar el amasado en amasadora fija y terminarlo en amasadora móvil. Cuando el amasado se realiza en amasadora móvil, éste debe completarse en la Central, antes del comienzo del transporte, tal como señala la Instrucción EHE. En cualquier caso, la duración del amasado debe ser suficiente para obtener una mezcla homogénea y completamente uniforme, cumpliéndose al menos dos requisitos del Grupo A y dos del Grupo B, de los contenidos en la siguiente tabla³:

Tabla 4.1.-Comprobación de la homogeneidad del hormigón. Deberán obtenerse resultados satisfactorios en los dos ensayos del Grupo A y en al menos dos de los cuatro del Grupo B.

ENSAYOS		Diferencia máxima tolerada entre los resultados de los ensayos de 2 muestras tomadas de la descarga del camión (1/4 y 3/4 de la descarga)
Grupo A	1. Consistencia (UNE-EN 12350-2) Si el asiento medio es igual o inferior a 9 cm	3cm
	Si el asiento medio es superior a 9 cm	4 cm
	2. Resistencia (*) En porcentajes respecto a la media	7,5%
Grupo B	3. Densidad del hormigón (UNE-EN 12350-6) 4. Contenido de aire (UNE-EN 12350-7), en % respecto al volumen del hormigón.	16 kg/m ³

ENSAYOS		Diferencia máxima tolerada entre los resultados de los ensayos de 2 muestras tomadas de la descarga del camión (1/4 y 3/4 de la descarga)
	5. Contenido de árido grueso (UNE 7295), en % respecto al peso de la muestra tomada.	1%
	6. Módulo granulométrico del árido (UNE 7295)	6%
		0,5

(*) Por cada muestra se debe romper a compresión, a 7 días y según el método de ensayo UNE-EN 12390-3, dos probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Estas probetas serán confeccionadas y conservadas según el método de ensayo UNE-EN 12390-2. Se determinará la medida de cada una de las dos muestras como porcentaje de la media total.

Los equipos de amasado deben examinarse con la frecuencia necesaria para detectar la presencia de residuos de hormigón o mortero endurecido, así como desperfectos o desgastes en las paletas o en su superficie interior, procediéndose, en caso necesario, a comprobar el cumplimiento de los requisitos anteriores³.

En el hormigón para cimentaciones especiales, la homogeneidad y cohesión del hormigón cobran gran importancia para evitar problemas durante su colocación. Por ello, y en el caso de utilizarse camiones para el amasado del hormigón, deben extremarse las precauciones para garantizar que se obtiene un hormigón homogéneo en todos los casos. Esta comprobación puede resultar complicada cuando el número de camiones involucrados es muy elevado, y sobre todo si pertenecen a diferentes empresas, ajenas en muchos casos a la propia central dosificadora. Si no se tienen suficientes garantías del resultado final del amasado del hormigón en todos los casos, puede ser recomendable exigir que el amasado se complete en central con amasadora fija, seleccionando para la obra una o varias centrales amasadoras.

Está prohibida la adición de agua al hormigón premezclado, a menos que estuviera indicada para permitir el correcto mezclado de aditivos inmediatamente antes del vertido. En todos los casos, la relación agua/cemento del proyecto tiene que ser mantenida⁶.

4.3 TRANSPORTE

Para el transporte del hormigón se deben utilizar procedimientos adecuados para conseguir que las masas lleguen al lugar de entrega en las condiciones estipuladas, sin experimentar variación sensible en las características que poseían recién amasadas³.



El transporte puede realizarse en amasadoras móviles, a la velocidad de agitación, o en equipos con o sin agitadores, siempre que tales equipos tengan superficies lisas y redondeadas y sean capaces de mantener la homogeneidad del hormigón durante el transporte y la descarga³. Normalmente se emplean camiones con cuba cerrada y provistos de agitación.

El tiempo transcurrido entre la adición de agua del amasado al cemento y a los áridos y la colocación del hormigón, no debe ser mayor de hora y media³. En tiempo caluroso, el tiempo límite debe ser inferior, a menos que se adopten medidas especiales como por ejemplo la utilización de aditivos retardadores. En el caso de utilizarse hormigones preparados, habrá que tener en cuenta la distancia de la central a la obra para ajustar el tiempo de transporte.

La incorporación de aditivos superplastificantes para obtener una adecuada puesta en obra debe ser analizada convenientemente, y los aditivos deben ajustar su dosificación a la proporción que resulte del estudio pertinente². Si se prevé añadir el aditivo en obra, el camión debe ser amasadora y debe disponer del correspondiente equipo dosificador de aditivo y reamasar el hormigón para dispersarlo dentro de la masa de forma homogénea. El tiempo de reamasado será al menos de 1 min/m³, y en ningún caso inferior a los 5 minutos¹.

Cuando el hormigón se amasa completamente en central y se transporta en amasadoras móviles, el volumen de hormigón transportado no debe exceder del 80% del volumen total del tambor. Cuando el hormigón se amasa, o se termina de amasar, en amasadora móvil, el volumen no excederá de los dos tercios del volumen total del tambor³. La velocidad de giro, en el caso de actuar como amasadora varía entre 4 y 16 r.p.m. y para actuar como agitador entre 2 y 6 r.p.m. El número total de revoluciones que debe dar la cuba, incluido transporte y amasado, no debe superar las 300¹, lo cual significa que para una velocidad de giro de 4 r.p.m el límite de tiempo de entrega es de 75 minutos, compatible con la mayor parte de los casos prácticos.

Los equipos de transporte deben estar exentos de residuos de hormigón o mortero endurecido, para lo cual se limpiarán cuidadosamente antes de proceder a la carga de una nueva masa fresca de hormigón. Asimismo, no deben presentar desperfectos o desgastes en las paletas o en su superficie interior que puedan afectar a la homogeneidad del hormigón³.

4.4 PUESTA EN OBRA

Con carácter general, la colocación del hormigón se puede hacer con medios de puesta en obra muy diversos. En la selección del equipo hay que considerar los siguientes aspectos¹:

- Capacidad de producción de hormigón. Así, las bombas son métodos continuos de puesta en obra que exigen gran capacidad de producción, por lo que puede ser necesario el suministro del hormigón a obra desde más de una central.
- Consistencia: el equipo debe ser capaz de manejar el hormigón del asiento especificado.
- Capacidad del equipo: debe ser adecuada para que el hormigón se mantenga plástico durante toda la colocación.

En el caso del hormigón para cimentaciones especiales, los requisitos anteriores pueden ser satisfechos realizando la puesta en obra mediante tubería Tremie o por bombeo⁵ (en casos excepcionales se permite el vertido directo). Sea cual sea el sistema elegido para poner en obra el hormigón, en ningún caso se debe tolerar la colocación en obra de masas que no tengan la consistencia requerida.

4.4.1 Operaciones previas

Antes de comenzar la puesta en obra del hormigón deben realizarse una serie de operaciones que resultan imprescindibles para obtener un buen resultado en el proceso:

- a) Sólo se debe proceder al hormigonado cuando la perforación esté limpia y las armaduras se encuentren en la posición prevista en los planos de proyecto, y entonces realizarlo tan pronto como sea posible^{6,7,9}. En concreto, el PG-3 indica que la duración entre el final de la limpieza de la excavación y el comienzo del hormigonado de los paneles debe ser inferior a cinco horas. Cuando esto no pueda ser respetado (por ejemplo, en el caso de jaulas de armaduras complejas), es necesario asegurarse que se respetan las propiedades del fluido de excavación antes de hormigonar¹⁸. Cuando se utilizan lodos de perforación, no se debe comenzar el hormigonado hasta comprobar que las propiedades de la suspensión sean satisfactorias. Es especialmente importante limitar el contenido de arena del lodo (debe ser inferior al 4% según EN 1536 y 1538, o al 3% según el PG3 y el Código Técnico de la Edificación). Si el lodo no cumple con los parámetros requeridos es preciso llevar a cabo su desarenado o sustitución por lodo limpio⁶. El control de los lodos de perforación es una tarea esencial dentro del proceso de ejecución de pilotes y pantallas. Se deben controlar las propiedades de los lodos de forma continua y en todas las etapas que constituyen la vida del lodo: en el momento de su fabricación, durante su utilización en la fase de perforación y antes de hormigonar el pilote o el panel de pantalla. La frecuencia del control deberá ser suficiente como para garantizar que todo el lodo que se utiliza en la obra cumple con las especificaciones requeridas de densidad, viscosidad, contenido de arena, pH, etc.
- b) La instalación de armaduras no debe realizarse hasta que haya concluido el proceso de desarenado o sustitución de los lodos de perforación. Si se prevé que la instalación de jaulas va a ser un proceso laborioso y largo, la limpieza del lodo puede finalizarse después de colocar las armaduras.
- c) Las jaulas no deben colocarse en contacto con el fondo de la excavación para facilitar el flujo del hormigón y conseguir un relleno uniforme de la base del elemento. La distancia entre el pie de la jaula y el fondo de la excavación no debe ser superior a 20 cm.
- d) Las armaduras deben estar libres de barro, aceite o cualquier otro tipo de contaminante, y tampoco deben estar muy oxidadas⁹.
- e) Para permitir un flujo adecuado del hormigón, la separación entre barras longitudinales de la armadura (armadura vertical en el caso de muros-pantalla) tiene que ser la máxima posible:
- f) En el caso de pilotes, si el elemento se hormigona en condiciones sumergidas, la separación mínima no debe ser inferior a 100 mm^{6,12}. La distancia mínima libre entre barras longitudinales o haces de barras de una hilada puede reducirse a 80 mm cuando se empleen áridos de tamaño máximo menor o igual a 20 mm⁶. En cuanto a la armadura transversal de los pilotes, la distancia mínima entre armaduras no debe ser menor a la establecida anteriormente para las barras longitudinales⁶.
- g) Para el caso de los muros-pantalla, la separación mínima entre armaduras verticales, no debe ser inferior a 100 mm. Esta distancia puede reducirse a 80 mm en paneles fuertemente armados cuando se empleen áridos de tamaño máximo menor o igual a 20 mm^{12,14}. El espacio vertical libre entre las armaduras horizontales debe ser de al menos 200 mm, aunque esta distancia se puede reducir a 150 mm si el tamaño máximo del árido no supera los 20 mm¹⁴ e incluso hasta 100 mm en aquellos casos en los que la armadura horizontal sea elevada¹². El Código Técnico de la Edificación⁵ recomienda que la separación mínima entre barras no sea inferior a cinco veces el diámetro del árido.
- h) En cuanto a la separación máxima entre barras, la Instrucción EHE³ establece valores máximos absolutos de separación entre armaduras de 300 mm con carácter general para



elementos estructurales de hormigón armado. Para el caso particular de pilotes, la norma europea⁶ permite una separación máxima de 400 mm para armaduras longitudinales, mientras que el PG-3 resulta notablemente más restrictivo, exigiendo una separación máxima de 200 mm¹².

Los elementos metálicos que formen parte de pilotes o pantallas no deben ser de acero galvanizado o de otros materiales que puedan producir efectos electrostáticos, ya que éstos pueden causar la corrosión electroquímica de las jaulas de armaduras y afectar negativamente a los lodos de perforación. En este último caso, pueden crearse capas de bentonita en lodos bentoníticos o telas de araña en suspensiones poliméricas que impidan el desarrollo normal del hormigonado⁶.

4.4.2 Colocación del hormigón

Aspectos generales especialmente importantes en la ejecución del hormigonado son:

- El hormigón y sus componentes deben cumplir los requisitos y recomendaciones mencionadas en el Capítulo 3.
- El hormigón colocado desde el fondo de la perforación debe tener la composición y consistencia especificadas.
- Debe impedirse la segregación o la contaminación del hormigón⁶.
- No debe haber discontinuidades en el hormigón colocado⁶.

La perforación se rellenará parcial o totalmente de hormigón, con el objeto de que se forme un elemento monolítico y compacto, con sección y altura requeridas. No se permitirá la contaminación del hormigón por ningún suelo, líquido u otro material. Se deben tomar medidas adecuadas para impedir el lavado de los finos del hormigón, debido a la acción de corrientes de agua subterráneas⁶. En este sentido, se debe tener especial precaución cuando en las inmediaciones del pilote se está bombeando agua para mantener el nivel freático. Finalmente, se debe evitar también la segregación del hormigón fresco⁷.

Durante el hormigonado se debe poner el mayor cuidado en conseguir que el hormigón rellene la sección completa en toda su longitud, sin huecos, bolsas de aire o agua, coqueras, etc⁷.

La trabajabilidad del hormigón será tal que permita llevar a cabo satisfactoriamente todo el proceso de hormigonado. Para que pueda realizarse un trabajo continuado, se dispondrá de un adecuado suministro de hormigón durante todo el proceso de vertido. El hormigón fresco se verterá siempre dentro de un hormigón que conserve su trabajabilidad. En cimentaciones especiales, no se puede utilizar vibraciones internas para la compactación del hormigón⁶.

Durante la ejecución de pilotes en terreno blando ($c_u \leq 15 \text{ kN/m}^2$), puede ser necesario contener el hormigón fresco en parte o en la totalidad de la longitud del pilote, mediante camisas perdidas o entubaciones permanentes⁶. En caso de utilizar entubación, ésta se limpiará, de modo que no quede tierra, agua, ni objeto o sustancia que pueda producir disminución en la resistencia del hormigón¹².

Es necesario controlar el volumen de hormigón que se va colocando y compararlo con el volumen teórico de llenado, aspecto que se desarrollará con detalle en el capítulo referente al Control de Calidad. Si el volumen colocado es significativamente menor al teórico, el elemento

ha podido experimentar estrechamientos de la sección de hormigón, colapso de las paredes laterales de la excavación o contaminaciones del hormigón. Si se sospecha la existencia de un defecto semejante, hay que investigar el estado del pilote⁸. Los detalles adicionales que deben realizarse en este control se recogen en el Capítulo 7 "Control de calidad".

Es conveniente que el hormigonado se lleve a cabo a un ritmo superior a 30 m³/h. El hormigonado de cada elemento de la cimentación debe realizarse sin interrupción, debiendo el hormigón que circula hacerlo dentro de un período de tiempo equivalente al 75% del comienzo del fraguado. Cuando se prevea un período mayor, deben utilizarse retardadores de fraguado⁷.

4.4.2.1 Colocación del hormigón con Tubo Tremie

El hormigonado de pantallas, pilotes sin sostenimiento, pilotes con lodos y pilotes con tubería de revestimiento, debe efectuarse empleando el procedimiento de vertido a través del tubo Tremie, y sólo como excepción, y bajo la expresa autorización del Director de las Obras, se permitirá el bombeo directo en excavaciones en seco². En concreto, el sistema de tubería Tremie es indispensable para el hormigonado de pantallas y pilotes en presencia de agua o lodos de perforación^{2,7}.

❖ Características del equipo

El tubo Tremie se compone de tuberías circulares alimentadas por un embudo y utilizadas para conducir el hormigón verticalmente, evitando la segregación originada por caída libre superior a 2 m y la ocasionada al golpear el hormigón con las armaduras u otros obstáculos. Por otro lado, el sistema evita la contaminación por los líquidos presentes en la perforación⁶. Algunas características generales del equipo son las siguientes¹:

- La tubería es de acero de paredes lisas y debe estar contrapesada para evitar la flotación, si se utiliza una placa para sellar la boca de la tubería, y ésta se sumerge vacía.
- Los tramos de tubería deben ensamblarse para permitir que las secciones superiores se puedan eliminar conforme progresa la colocación.
- Las juntas deben ser estancas y de conexión rápida.
- El embudo que alimenta estos dispositivos debe ser grande y de paredes inclinadas para descargar el hormigón rápidamente sin obstrucciones.

Para permitir el libre flujo del hormigón, el tubo Tremie debe ser liso y tener un diámetro interior uniforme de, como mínimo, 6 veces el tamaño máximo de árido⁵ ó 150 mm, adoptándose el mayor de cualquiera de los dos valores^{6,14}. El grosor de pared debe ser suficiente para proporcionarle la resistencia y rigidez necesarias⁵.

La forma y dimensión externa del tubo Tremie, incluidas las uniones, ha de permitir su libre movimiento dentro de las armaduras, por lo que no debería ser superior a^{6,7}:

- 0,35 veces el diámetro del pilote o el diámetro interior de la entubación.
- 0,6 veces el espacio libre interior de la jaula de armadura para pilotes circulares, y 0,80 en el caso de pilotes no circulares.
- 0,50 veces la anchura de la pantalla y 0,80 veces la anchura interior de la jaula de armaduras de pantallas.

El hormigón puede colocarse a través de uno o varios tubos. Cuando se utilizan varios tubos de hormigonado, es preciso alimentarlos de modo que el hormigón se distribuya de una manera uniforme¹⁴. En el caso particular de pantallas, el número de tubos de hormigonado a utilizar en un mismo panel se debe determinar de manera que se limite el recorrido horizontal del hormigón de cada tubo. En condiciones normales, se limitará el recorrido horizontal del hormigón a 2,5 m⁷ (3m según la norma europea de pantallas¹⁴). Asimismo, se recomienda utilizar al menos un tubo de vertido por jaula de armaduras cuando hay varias jaulas por panel^{12,14}.

❖ Descripción del sistema de vertido

En la colocación con tubo Tremie, para evitar la contaminación durante la puesta en obra del hormigón en perforaciones con agua o lodos, se usan dos procedimientos habitualmente: se sella el fondo del tubo con algún tipo de placa antes de que se introduzca en la perforación, o se coloca un tapón o bola en la boca del tubo, una vez que el tubo se ha introducido en la perforación pero antes de cargarlo con hormigón⁵.

Cuando se utiliza la técnica de la placa final y tubería vacía, las tuberías deben llenarse de hormigón antes de comenzar a elevarlas, apoyadas en el fondo y elevando la tubería una vez llena a una distancia máxima de 150 mm para comenzar a fluir, dejando que el hormigón se amontone alrededor de la boca. A continuación se realiza la elevación del tubo lentamente para mantener la profundidad de inmersión¹ (Figura 1).

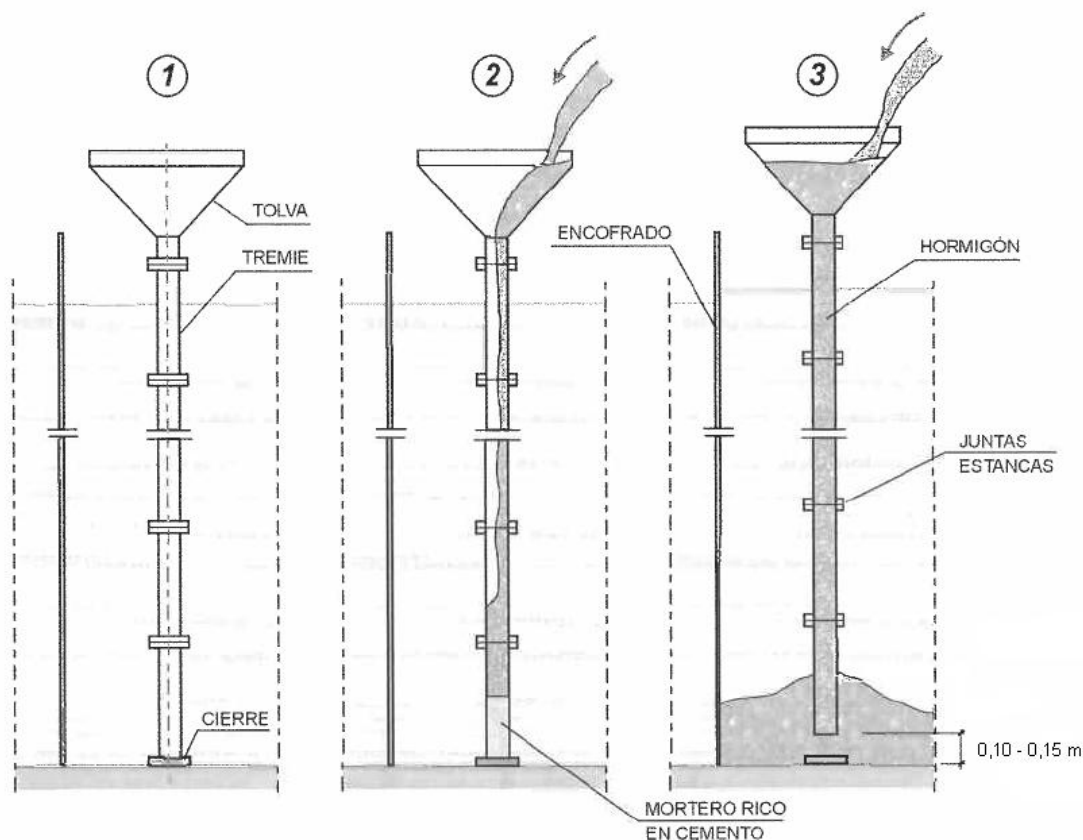


Figura 1. Puesta en obra del hormigón con tubo Tremie. Método del cierre de fondo¹⁵.

En las colocaciones que utilizan tapón o bola, el hormigón debe verterse lentamente para forzar que la bola baje, lo cual permite mantener siempre separado el hormigón del agua o los lodos¹. La tubería debe mantenerse a una distancia máxima de 100¹⁴ ó 150 mm del fondo para permitir que el agua o lodo escapen, así como la bola cuando alcance la boca mediante el empuje del hormigón fresco. Después no debe elevarse otra vez hasta que el hormigón se amontone alrededor de la boca del tubo¹ (Figura 2). En cualquier caso, cuando la bola sale del tubo, siempre hay una pequeña lixiviación del hormigón que se coloca inicialmente⁵.

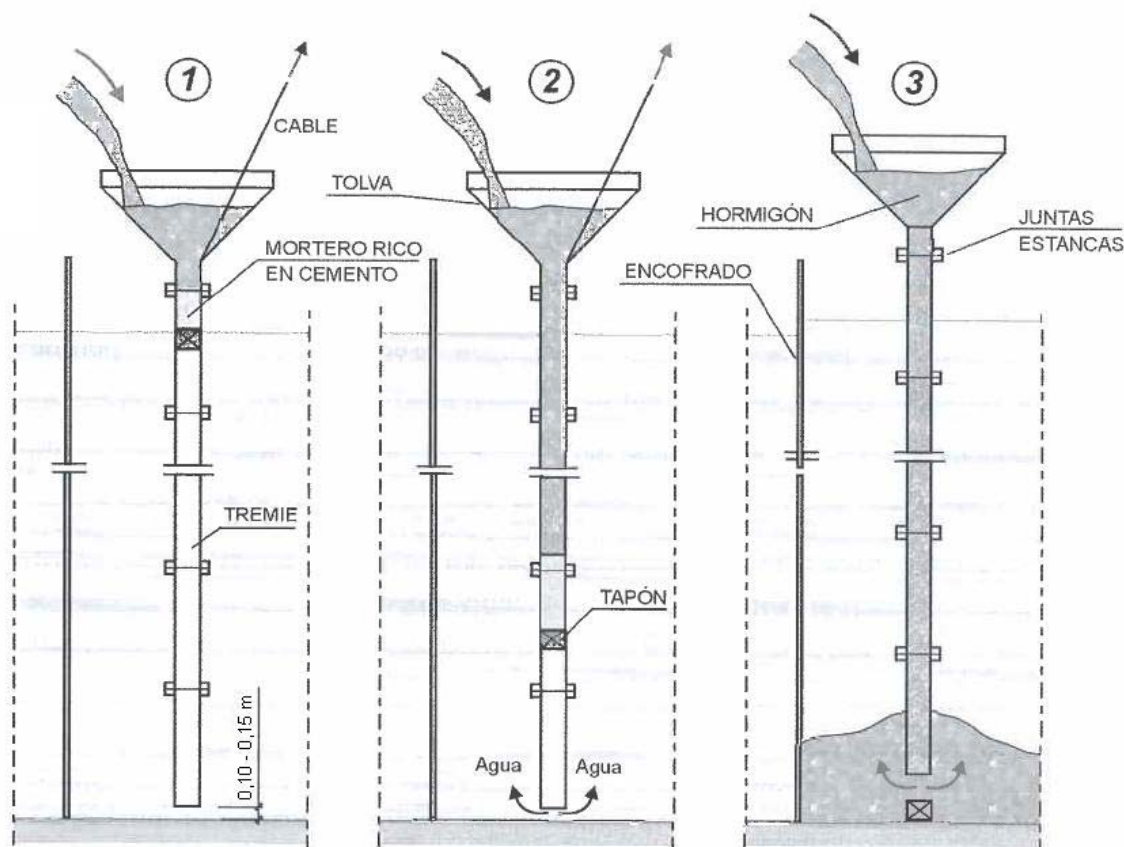


Figura 2. Puesta en obra del hormigón con tubo Tremie. Método del tapón deslizante¹⁵.

Para lubricar el tubo Tremie, puede emplearse, como primera amasada, una mezcla rica en cemento o una carga de mortero de cemento. Para permitir que el hormigón fluya fuera del tubo Tremie, se izará dicho tubo ligeramente, sin exceder un valor equivalente al diámetro interior del mismo. El vertido debe realizarse a continuación rápidamente para rellenar toda la base del elemento, con el fin de que no queden bolsadas de hormigón que pueda haberse segregado al inicio del vertido. A medida que el nivel de hormigón asciende en la perforación durante el vertido, el tubo Tremie se irá retirando progresivamente. El tubo Tremie estará en todo momento sumergido en el hormigón fresco y trabajable previamente vertido. Sólo será extraído del hormigón cuando el proceso haya finalizado.



El hormigón sumergido no puede compactarse con vibración en su interior (la compactación se consigue por la fluidez del hormigón, su peso propio y la sobrecarga de líquido sobre la columna de hormigón)⁶.

En pilotes, la inmersión del tubo Tremie en el hormigón no debe ser nunca inferior a 1,5 m, en especial cuando se desconectan tramos de dicho tubo y cuando se recuperan y desconectan tramos de la entubación provisional⁶. Para pilotes de diámetro mayor o igual que 1,2 m, la inmersión debe ser al menos de 2,5 m y para elementos portantes de sección no circular al menos de 3,0 m, en especial cuando se utilizan dos o más tubos Tremie⁶. La profundidad mínima de inmersión puede reducirse a 2 m si el nivel superior del hormigón se conoce con precisión y cuando el hormigón llega cerca de la superficie del suelo para facilitar el vertido del mismo⁷.

Análogamente, y para el caso de muros-pantalla, una vez se haya empezado el hormigonado, el tubo de vertido debe estar siempre sumergido al menos 3 m en el hormigón fresco. La profundidad mínima de inmersión recomendada es de 3 m, aunque puede reducirse a 2 m si el nivel superior del hormigón se conoce con precisión. Se puede reducir la profundidad de inmersión del tubo cuando el hormigón se aproxima a la superficie del suelo para facilitar el vertido del mismo^{7,14}.

Una vez finalizado el vertido, no debe extraerse el tubo Tremie con demasiada rapidez, ya que el efecto de succión resultante podría producir imperfecciones en los elementos hormigonados⁶.

4.4.2.2 Colocación por bombeo

En pilotes de barrena continua y de desplazamiento por rotación, el hormigonado se realiza por bombeo a través del fuste del útil de perforación. Se tendrá especial cuidado en la compatibilidad entre la velocidad de extracción del útil y el ritmo de subida del hormigón en la excavación, de forma que se garantice en todo momento un relleno uniforme, siendo recomendable el empleo de instrumentación que garantice el proceso².

La colocación mediante bombeo es similar a la colocación sólo con tubos Tremie, aunque existen las siguientes diferencias¹:

- El mecanismo de flujo del hormigón es la presión de la bomba en vez de la gravedad.
- La dosificación debe permitir no sólo el bombeo sino el flujo del hormigón después de dejar la tubería.
- Las tuberías tienen un diámetro menor (con un mínimo de 100 mm⁸), utilizando habitualmente secciones flexibles para la porción embebida en el hormigón.
- La acción de la bomba puede originar movimientos laterales de la tubería embebida en el hormigón fresco, lo que puede contribuir a la formación de lechada en la superficie de contacto de la tubería y el hormigón. Para evitar este problema, la FHA⁵ recomienda utilización de tubo de acero rígido.
- Puede ser necesaria una válvula de escape cerca del punto más alto de la tubería para evitar un bloqueo por vacío.

Durante la colocación del hormigón, el tubo debe permanecer siempre sumergido en el hormigón al menos 1,5 m⁵.

La puesta en obra del hormigón por bombeo se realiza a través de tubos de diámetro de 100 a 125 mm por lo que el tubo puede estar cerca del fondo de la excavación (100 mm) al comenzar la colocación del hormigón, permitiendo que se desprenda el tapón. Así se reduce el peligro inicial de contaminación del hormigón, lo que puede ser crítico en pequeñas cavidades de roca con una elevada resistencia de diseño donde se ha considerado resistencia por punta del pilote. Además, el control del volumen de hormigón colocado por este procedimiento puede realizarse de manera sencilla.

Cuando el vertido del hormigón se realiza mediante bombeo hidráulico o neumático, los tubos de conducción deben estar convenientemente anclados y se debe poner especial atención en su limpieza interior una vez terminado el hormigonado, durante el cual la bomba debe ser parada a la menor señal de obstrucción de la tubería¹⁹.

4.4.2.3 Otros sistemas de colocación

4.4.2.3.1 Vertido directo

El vertido directo del hormigón es una forma de colocación que se utiliza de forma excepcional en cimentaciones especiales. En este caso el hormigón se coloca mediante cubos o trompas de elefante, aunque ello supone incrementar el riesgo de segregación por caída libre del hormigón. En este sentido, y tal como indica la Instrucción EHE, la altura máxima de vertido en caída libre debe ser inferior a dos metros. Alturas mayores producen inevitablemente la disgregación de la masa, y puede incluso desplazar los encofrados y armaduras. En el vertido directo, deberá tenerse en cuenta esta limitación y realizarse siempre de manera que se evite la segregación. Otras normativas¹⁹ reducen esta distancia máxima de vertido a 1 m.

Este sistema sólo puede utilizarse ocasionalmente en perforaciones en seco o entubadas. Se considera una excavación en seco cuando el agua se infiltra a una velocidad inferior a 6 mm/minuto en el fondo de la excavación. Las excavaciones en seco son posibles en suelos coherentes o rocosos siempre que presenten una resistencia suficiente para garantizar la estabilidad de las paredes de la zanja. En estos casos de perforación en seco, también puede realizarse el vertido mediante tubos Tremie, lo cual siempre resulta más aconsejable. El hormigonado con bomba también es otra alternativa posible en las excavaciones en seco¹⁴.

Cuando la base de la perforación contenga agua, no se aplicará la técnica de vertido directo, para lo cual se realizará una comprobación inmediatamente antes del vertido y si se detectara agua, se aplicará la técnica de hormigonado sumergido.

4.4.2.3.2 Pilotes ejecutados mediante inyección ("prepacked")

Mediante el sistema "prepacked", se coloca en la perforación el árido grueso, con una granulometría adecuada, y se procede al relleno de los huecos existentes entre sus distintos granos mediante la inyección de un mortero bombeado a través de unos tubos ranurados colocados en la masa granular, que llegan hasta el fondo de la excavación y que se van elevando conforme la inyección va realizándose¹⁷.



Antes de ejecutar pilotes inyectados se deben efectuar pruebas para determinar la composición, la fluidez y el tiempo de endurecimiento de la lechada; la distribución de la lechada en el árido y el número necesario de tubos de inyección y su distribución⁶.

Una vez que la perforación esté terminada y limpia, ésta se rellenará con árido limpio y grueso de tamaño 25 mm o superior, con estructura abierta y coeficiente de huecos suficiente para permitir la penetración total de la lechada⁶.

La inyección se realizará a través de tubos de inyección colocados hasta el fondo del pilote. La presión y el caudal de inyección deberán ser suficientes para que la lechada penetre completamente en los huecos del árido⁶.

Si los tubos de inyección tienen que ser recuperados simultáneamente al avance de la inyección, se debe mantener suficiente inmersión de los mismos para asegurar una distribución uniforme de la lechada en toda la sección transversal del pilote⁶.

4.4.3 Incidentes durante la colocación del hormigón

El hormigonado de un pilote se debe realizar, en todo caso, sin interrupción, de modo que, entre la colocación de dos masas sucesivas, no pase tiempo suficiente para el inicio del fraguado. Si por alguna avería o accidente, esta prescripción no se cumpliera, la Dirección de Obra debe decidir si el pilote puede terminarse y considerarse válido o no¹¹.

4.4.3.1 Colocación con Tubo Tremie

Fallos en el flujo del hormigón

Algunos factores relacionados con problemas relativos a fallos en el flujo del hormigón son⁵:

- El tubo Tremie es demasiado pequeño para la trabajabilidad del hormigón. Si el tubo tiene un diámetro inferior a 250 mm, el hormigón debe tener un asiento en el cono de 200 a 225 mm y el tamaño máximo del árido grueso debe ser 12 mm como máximo.
- El tubo Tremie no está correctamente preparado para su uso, ya que presenta suciedad u obstrucciones; o está caliente en caso de acopio continuado al sol.
- El tubo Tremie presenta deficiencias de estanqueidad y el lavado del hormigón origina atascos durante el vertido.
- El hormigón presenta nódulos aglomerados derivados de un mal proceso de amasado.

Interrupción del hormigonado

En la construcción de cimentaciones especiales, en el caso de que se interrumpa el hormigonado bajo agua o lodo, no se debería aceptar el pilote salvo que, con la aceptación explícita del Director de las Obras, se arbitren medidas para su recuperación y terminación, así como para la comprobación de su correcta ejecución y funcionamiento. El elemento que haya sido rechazado por el motivo indicado, habrá de ser rellenado, sin embargo, en toda su longitud

abierta en el terreno. La parte de relleno, después de rechazado el elemento, puede ejecutarse con hormigón cuya resistencia característica mínima a compresión sea de 12,5 MPa a 28 días. Su ejecución debe hacerse con los mismos cuidados que si se tratara de un pilote que hubiera de ser sometido a cargas¹².

Si se produce una interrupción del hormigonado, deberá hacerse un tratamiento adecuado para asegurar la correcta unión entre los dos hormigones.

Pérdida de la inmersión

En el caso de que se pierda accidentalmente la inmersión del tubo Tremie durante el hormigonado, la ulterior colocación no debe continuar a menos que se cumplan los siguientes requisitos:

- El hormigón dentro del cual hay que colocar el hormigón conserve su trabajabilidad⁶,
- El tubo Tremie se vuelva a sumergir a una profundidad suficiente dentro del hormigón previamente colocado⁶, protegiendo la boca con una funda que se expulsará al verter de nuevo el hormigón y evitará la mezcla del hormigón con el agua o lodo de perforación
- No se haya introducido agua o contaminación en el hormigón que quedará por debajo de la cota de descabezado⁶.

En el caso particular de pilotes con entubación, si se pierde la inmersión de la entubación y/o hay posibilidad de haberse producido una infiltración de material extraño en el tramo de pilote recién hormigonado, el vertido tiene que ser interrumpido. Si fuera posible extraer la armadura y el hormigón y siempre que ambas operaciones pudieran hacerse a tiempo, el pilote puede sustituirse por completo o construirse de nuevo en su emplazamiento original. Pueden recuperarse los pilotes formando una junta de construcción, después de que se haya retirado todo el hormigón de calidad insuficiente y haya quedado al descubierto hormigón sano en toda la sección con el objeto de posibilitar la formación de una junta sin defectos. Si la preparación de una junta de construcción no es posible, el pilote tiene que ser abandonado y rellenarse con material adecuado la parte vacía de la perforación por encima de la columna de hormigón⁶.

Se deben llevar a cabo ensayos de integridad para documentar la calidad de cualquier pilote en que se haya sumergido de nuevo el tubo Tremie o se haya realizado una junta de construcción⁶.

Variación de la profundidad de la inmersión

Es preciso que el nivel del hormigón en la excavación y la retirada de la tubería Tremie sean controlados numéricamente y no sólo cualitativamente. En especial hay que controlar las profundidades de inmersión irregulares, ya que profundidades pequeñas indican siempre un proceso de elevación inadecuado. Cuando se producen profundidades pequeñas de inmersión momentáneas, seguidas de un incremento de la profundidad inmediato, pueden asociarse posteriormente con puntos defectuosos del hormigonado⁴.

Otras incidencias

Hay otros dos problemas que pueden producirse durante la carga inicial de hormigón en el tubo Tremie: el hormigón puede segregarse y la presencia de bolsas de aire en el tubo pueden



impedir que éste se llene de hormigón. El problema de la segregación se puede eliminar utilizando una dosificación adecuada, en especial un tamaño máximo del árido grueso indicado en el Apartado 4 del Capítulo 3; en cuanto a las bolsas de aire, éste se puede extraer del tubo mediante la colocación de un tubo respiradero provisional en el fondo, antes de iniciar el hormigonado⁵.

Las armaduras de los pilotes no deben moverse apreciablemente durante el hormigonado. Todo pilote en el que la armadura suba o descienda superando los límites establecidos debe analizarse convenientemente.

4.4.3.2 Colocación por bombeo

En ocasiones, el bombeo directo del hormigón puede presentar algunos problemas, normalmente asociados a posibles vacíos generados dentro de la tubería, que producen su bloqueo y posiblemente la segregación del hormigón. Este efecto se puede eliminar usando un tapón que sea empujado a través de la tubería por el hormigón de arranque; este tapón hay que colocarlo en la boca del tubo, no al fondo⁵.

Otro problema que se puede presentar es que la bomba no tenga la suficiente capacidad de bombeo para reproducir el arranque inicial del hormigón que origina el tubo Tremie. A este problema se añade la necesidad de elevar inicialmente el tubo para permitir que salga el tapón por el fondo, por lo que en la base de la excavación se puede producir la mezcla del hormigón bombeado con el agua o los lodos. Para minimizar este problema, la bomba debe tener el mayor volumen posible y el tubo se debe elevar lo mínimo posible como para que se inicie el flujo de hormigón⁵.

Como se ha comentado anteriormente, el tubo debe permanecer siempre sumergido en el hormigón al menos 1,5 m. Para ello, al ir elevando el tubo hay que evitar que el desequilibrio que se produce entre las presiones del interior del tubo y del hormigón fluido de la perforación empuje el tubo hacia el exterior de la columna de hormigón fresco, con la aparición consiguiente de un defecto de hormigonado. Para evitarlo puede permitirse que la bomba se pare momentáneamente o se reduzca la presión de bombeo durante la recolocación del tubo⁵.

Durante el hormigonado de los pilotes de barrena continua por el tubo central se pueden producir problemas de desprendimientos del terreno, contaminando el hormigón, si la elevación de la barrena se realiza a una velocidad inadecuada con el bombeo del hormigón. Por ello es conveniente que la realización de estas operaciones se ejecute con sumo cuidado y se instrumente el proceso.

4.4.3.3 Hormigonado en tiempo frío y en tiempo caluroso

La colocación del hormigón en condiciones de tiempo frío o caluroso exige tomar una serie de precauciones para evitar que se vean dañadas las propiedades del hormigón.

❖ Hormigonado en tiempo frío:

Se entiende por tiempo frío el período durante el cual existe, durante más de tres días, las siguientes condiciones³:

- La temperatura media diaria del aire es inferior a 5 °C.
- La temperatura del aire no supera los 10 °C durante más de la mitad del día.

Según el artículo 71.5.3.1 de la Instrucción EHE³, la temperatura de la masa de hormigón, en el momento de verterla, no debe ser inferior a 5 °C, y está prohibido verter el hormigón sobre elementos (armaduras, moldes, etc.) cuya temperatura sea inferior a 0 °C. La colocación del hormigón en zonas de alta concentración de armaduras a temperatura muy baja puede originar una congelación local del hormigón alrededor de la armadura¹.

La Instrucción EHE señala que en general debe suspenderse el hormigonado siempre que se prevea que, dentro de las 48 horas siguientes, pueda descender la temperatura ambiente por debajo de los 0 °C. En los casos en que, por absoluta necesidad, se hormigone en tiempos de heladas, se deben adoptar las medidas necesarias para garantizar que las propiedades del hormigón no se ven afectadas. El empleo de aditivos aceleradores de fraguado o aceleradores de endurecimiento o, en general, de cualquier producto anticongelante específico para el hormigón, requiere una autorización expresa, en cada caso, de la Dirección de Obra; nunca deben utilizarse productos susceptibles de atacar a las armaduras, en especial los que contienen ión cloro³.

En tiempo frío, la hidratación de la pasta de cemento se retrasa con las bajas temperaturas; además, la helada puede dañar de manera permanente al hormigón poco endurecido si el agua contenida en los poros se huela y rompe el material³.

En el caso de cimentaciones especiales los problemas citados no suelen presentarse en el hormigón colocado, al encontrarse éste enterrado y por tanto no sufrir de forma directa las bajas temperaturas. Adicionalmente, el propio calor de hidratación desprendido por el cemento en el hormigón confinado en el terreno, ayudará a que éste eleve su temperatura. En este tipo de obras, por tanto, las medidas a tomar en hormigonado en tiempo frío deben centrarse en las operaciones previas a la colocación. Así se debe evitar que ninguno de los componentes se encuentre congelado y controlar que sus temperaturas se mantengan uniformes entre amasadas para evitar variaciones en la demanda de agua, velocidad de fraguado y asiento del hormigón¹. En particular, el árido expuesto a heladas será calentado, de forma que no entren en la mezcla adherencias de hielo o escarcha⁶. En el transporte del hormigón en camión, las pérdidas de temperatura pueden minimizarse girando la cuba lo indispensable durante el transporte. Si las temperaturas no son excesivamente bajas y se evitan esperas prolongadas, el hormigón no perderá más de 3°C durante el transporte¹.

Aún teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, existe normativa que, por motivos de seguridad, indica que deben suspenderse los trabajos cuando llueva intensamente o nieve¹⁹.

❖ Hormigonado en tiempo caluroso:

Se entiende por tiempo caluroso aquél en que se produzca cualquier combinación de altas temperaturas, baja humedad relativa y alta velocidad del viento, que tiendan a empeorar la calidad del hormigón o que puedan conferir propiedades no deseadas³.



Si la temperatura ambiente es superior a 40 °C o hay un viento excesivo, se debe suspender el hormigonado, salvo que, previa autorización expresa de la Dirección de Obra, se adopten medidas especiales³. A este respecto, existe normativa que, por motivos de seguridad, indica que deben suspenderse los trabajos cuando exista viento de velocidad superior a 50 km/h¹⁹.

Las temperaturas elevadas del hormigón fresco aceleran el fraguado, aumentan la velocidad de hidratación y la exigencia de agua, y conducen a una resistencia final más baja; además, se dificultan las condiciones de puesta en obra³.

En consecuencia, debe tratarse de asegurar que la temperatura del hormigón en el momento del vertido sea inferior a 35 °C en el caso de estructuras normales, y menor que 15 °C en el caso de grandes masas de hormigón³.

En grandes macizos de hormigón, pueden alcanzarse internamente altos picos de temperatura que podrían ocasionar fisuración térmica en el hormigón. Para el caso particular de cimentaciones especiales, actuarán como factor favorable las bajas temperaturas presentes en el terreno circundante (12 a 15°C) a cierta profundidad, siempre que el elemento no tenga unas dimensiones excesivamente elevadas.

Según el artículo 71.5.3.2 de la Instrucción EHE³, cuando el hormigonado se efectúe en tiempo caluroso, se deben adoptar las medidas oportunas para evitar la evaporación del agua de amasado, en particular durante el transporte del hormigón y para reducir la temperatura de la masa. Para ello, los materiales constituyentes del hormigón deben estar protegidos del soleamiento. En particular, resulta de gran ayuda regar los acopios de árido y colocarlos a la sombra. El árido que se procesa con lavado, o se almacena húmedo y a la sombra, puede permanecer varios días a la temperatura del agua de lavado¹.

La Instrucción RC-08²⁰ recomienda en este caso utilizar los cementos comunes tipo CEM II, CEM III/A, CEM IV/A y CEM V/A.

En caso de temperaturas ambientales altas, el agua puede refrigerarse o sustituirse hasta un 50% de su peso, mediante trozos de hielo para enfriar el hormigón fresco⁶. La utilización de escamas de hielo permite reducir la temperatura del hormigón hasta en 11 °C. Es conveniente que el hielo no se funda antes de ponerlo en contacto con el resto de componentes, pero debe hacerlo completamente antes de terminar el amasado, por lo que éste debe prolongarse. Si las escamas de hielo no tienen un tamaño grande, deben fundirse tras cerca de dos minutos de amasado¹.

4.4.4 Precauciones después del hormigonado

Cuando se coloca el hormigón con tubo Tremie, es habitual que la parte superior sea de una calidad inferior a la exigible. Por este motivo, es necesario verter una cantidad sobrante de hormigón para garantizar las propiedades exigidas para el hormigón situado debajo del nivel de descabezado prescrito^{14,7}. Su valor está en función de la profundidad del nivel de descabezado, las dimensiones del elemento y del número de tubos de vertido¹⁴.

En pilotes, si el hormigonado se hace con agua o lodos en el tubo, se debe hormigonar la cabeza del pilote hasta una cota al menos 30 cm por encima de la indicada en Proyecto y demolerse posteriormente, en la operación de descabezado, este exceso por estar constituido por lechada deslavada que refluye por encima del hormigón colocado. Si al efectuar dicha demolición se observa que los 30 cm no han sido suficientes para eliminar todo el hormigón

deslavado y de mala calidad, debe proseguirse la demolición hasta sanear completamente la cabeza, reemplazando el hormigón demolido por hormigón nuevo, bien adherido al anterior¹². Para el caso de pantallas, la altura de descabezado se fijaba en 30 cm en la antigua Norma Tecnológica de la Edificación¹⁷.

Además, si la cota superior de hormigonado se encuentra por debajo del nivel freático, se debe mantener, sobre el hormigón fresco, una presión igual o superior a la presión externa del acuífero⁶.

El descabezado debe hacerse con ayuda de útiles que no sean susceptibles de perjudicar al hormigón, las armaduras o cualquier dispositivo de medida instalado¹⁴. El riesgo de grietas extensas, provocadas por el uso de equipos mecánicos en el descabezado, puede obligar a restricciones en el tipo y la dimensión del equipo demoledor de hormigón utilizado⁶. La fase final del descabezado debe hacerse sólo cuando el material esté suficientemente duro. Cuando sea posible, se puede ejecutar una fase preliminar de descabezado, no alcanzando el nivel final de descabezado antes del endurecimiento del hormigón¹⁴.

Finalmente y para el caso particular de muros pantalla, después del hormigonado, la excavación que presente un vacío por encima del hormigón, al encontrarse la cota superior de la pantalla por debajo del murete, se debe rellenar con hormigón pobre u otros materiales adecuados. En algunos casos será necesario apuntalar los muretes guía^{14,7}.

4.4.5 Operaciones especiales en casos particulares de ejecución

4.4.5.1 Hormigonado de pilotes con entubación recuperable

En el caso de los pilotes ejecutados con entubaciones recuperables, no se debe iniciar la extracción de la entubación hasta que la columna de hormigón haya alcanzado dentro de la misma una altura suficiente como para generar una sobrepresión adecuada, que evite infiltraciones de agua o terreno desde la base de la entubación y que la jaula de armadura pueda ser arrastrada⁶.

La extracción debe llevarse a cabo mientras el hormigón tenga la trabajabilidad requerida. Durante el proceso de extracción se debe mantener dentro de la entubación un volumen y una altura suficientes de hormigón con objeto de equilibrar la presión externa, y permitir que el espacio anular dejado por la extracción del tubo se llene de hormigón⁶. En concreto, la altura mínima de hormigón en el interior de la entubación debe ser igual a dos veces el diámetro del pilote¹².

El suministro de hormigón y la velocidad de extracción de la entubación serán tales que no puedan producirse infiltraciones de suelo o agua en el hormigón fresco recién vertido, incluso en el caso de que el nivel del hormigón descendiera súbitamente por la aparición de una cavidad fuera de la entubación (esto es especialmente importante en terreno suelto o blando o en las proximidades de la cabeza del pilote). Se debe tomar nota, además de las especificaciones generales, de las profundidades de la entubación y del tubo Tremie⁶.

Las recomendaciones ACI de pilotes perforados indican que durante la extracción de la entubación el máximo desplazamiento vertical admisible de la armadura es de 150 mm⁹.



4.4.5.2 Hormigonado de pilotes con camisa perdida

Con el objeto de confinar el hormigón fresco dentro de la perforación, puede presentarse la necesidad de tener que utilizar entubaciones o encamisados permanentes. En ocasiones, cuando se colocan encamisados permanentes después de la perforación, pueden quedar cavidades en el terreno en torno al fuste del pilote. De conocerse o sospecharse la existencia de tales cavidades, que pueden producir posibles asentamientos del terreno que afecten a estructuras adyacentes, se adoptarán medidas para rellenar las mismas⁶.

4.4.5.3 Hormigonado de pilotes de barrena continua

El hormigonado de pilotes perforados con hélice continua se realiza colocando el hormigón a través del eje hueco de la hélice, que debe tener un dispositivo de cierre en su base para evitar entradas de agua o terreno hasta tanto inicie la colocación del hormigón.

Existen tecnologías que permiten el descenso del tubo central de hormigonado por el interior de la barrena, logrando, al comienzo del bombeo del hormigón, que el mismo se introduzca dentro de la primera masa bombeada. En el descenso, el tubo exterior descubre dos ventanas alojadas en el tubo central. Por estas ventanas, se empieza a bombear hormigón a presión. El hormigón continúa bombeándose por el tubo central, que se comporta como un verdadero sistema Tremie. La distancia entre la base del tubo sumergido y la base de la barrena puede alcanzar hasta 1,50 m. Una vez completamente extraído el tubo central, la elevación de la barrena y el tubo de hormigonado es simultánea, desplazándose conjuntamente respecto al mástil guía. La correcta ejecución del proceso de hormigonado está asegurada por el sistema Tremie en el que el aporte de nuevo hormigón se realiza a través de las ventanas siempre en el seno del hormigón ya bombeado, y los detritos que puedan desprenderse durante la elevación de la barrena se mantienen siempre sobre la superficie del hormigón subiendo con ella.

En el caso de que no pudiera iniciarse el flujo de hormigón, es necesario extraer completamente la hélice del terreno con rotación en sentido contrario y rellenar la perforación para que no queden huecos y haya hundimientos. El pilote puede ser posteriormente reperforado en el mismo emplazamiento hasta, como mínimo, la profundidad original⁶.

Durante el vertido, el hormigón en la boca de la hélice debe mantenerse con una presión superior a la externa, para que así el hueco dejado por la extracción de la hélice se rellene instantánea y completamente⁶.

Durante la extracción y la colocación del hormigón la hélice no puede ser girada o sólo a baja velocidad y en el mismo sentido usado en la perforación⁶.

Debe mantenerse un adecuado aporte de hormigón para rellenar el pilote, hasta tanto la punta de la hélice haya alcanzado la plataforma de trabajo, teniendo en cuenta que para introducir la jaula de armadura, es generalmente necesario llevar el hormigón hasta la cota de la plataforma de trabajo⁶.

Para el control de la continuidad, la supervisión de la construcción del pilote debe incluir el control del aporte de hormigón, la presión de hormigonado, la velocidad de extracción y el registro de rotación de la hélice⁶.

Una vez colocado el hormigón, la armadura del pilote se introduce a posteriori, hincándola en el hormigón aún fresco hasta alcanzar la profundidad de proyecto. Para realizar correctamente esta operación, el hormigón debe tener unas condiciones especiales que permitan hincar la armadura hasta la profundidad requerida en proyecto, incluso siendo ésta muy elevada.

4.4.5.4 Pantallas de pilotes secantes

Las pantallas de pilotes secantes están formadas por pilotes primarios y secundarios, solapados entre sí. Los pilotes primarios no suelen ir armados. En caso contrario, su armadura debe tener unas dimensiones acordes con los solapes entre pilotes proyectados. Es conveniente, como ya se vio en el capítulo 3, que el hormigón constituyente de los pilotes primarios tenga una resistencia a compresión simple a 28 días inferior a 3 N/mm². Es frecuente también utilizar mezclas plásticas de bentonita-cemento en estos pilotes.

4.4.5.5 Inyección externa de pilotes in situ

En pilotes perforados moldeados in situ, y en los casos en que sea necesario, la inyección de la punta sólo se debe efectuar cuando el hormigón haya endurecido.

Esta inyección se realiza habitualmente por alguno de los siguientes procedimientos:

- A través de tubos instalados para los ensayos sónicos del pilote.
- Por un sondeo en el centro ejecutado hasta el fondo del pilote.

4.4.5.6 Extracción de juntas en muros pantalla

Normalmente, el proceso de ejecución de muros pantalla incluye la utilización de juntas provisionales entre paneles. La extracción de las mismas deberá llevarse a cabo de forma que no se ponga en peligro la calidad del hormigón de la pantalla.

Si se emplean juntas circulares, la extracción se realizará unas horas después del hormigonado, cuando el hormigón presente una consistencia suficiente como para que no se produzcan corrimientos del material hacia el hueco que deja la junta.

En el caso de utilizar juntas planas trapezoidales, la extracción se llevará a cabo durante la excavación del panel contiguo al que se ha hormigonado. En el proceso de retirada de la junta se tomarán las precauciones suficientes para no dañar el hormigón de la pantalla.

4.5 Bibliografía

- 1.- CALAVERA RUIZ, J.; ALAEJOS GUTIÉRREZ, P.; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J.; GONZÁLEZ VALLE, E. y RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (2004) *Ejecución y control de estructuras de hormigón*. Ed. INTEMAC. Madrid.
- 2.- PRIETO TERCERO, L. Recomendaciones sobre las características del hormigón a colocar en pantallas y pilotes mediante el procedimiento "tremie". Disponible en <http://www.ciccp.es/default.asp?indice=669&dem=6>. (Consulta: mayo de 2007).
- 3.- MINISTERIO DE FOMENTO (1998). *Instrucción de Hormigón Estructural: EHE*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 4.- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1988). *Cast-in-situ concrete diaphragm walls. Design and construction. DIN 4126*. Berlín. Ed: DIN.
- 5.- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1999). *Drilled shafts: construction, procedures and design methods. Publication N° FHWA-IF-99-025*.



- 6.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Bored piles. PRE-NORMA prEN 1536:2008.*
- 7.- Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C. Seguridad estructural. Cimientos (2006).
- 8.- ACI (2006c). Drilled piers. ACI 336.3R. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 3*. Detroit: Ed. American Concrete Institute.
- 9.- ACI (2006a). Specification for the construction of drilled piers. ACI 336.1. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 3*. Detroit: Ed. American Concrete Institute.
- 10.- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1990). *Bored cast-in-place piles. Formation, design and bearing capacity. DIN 4014*. Berlín. Ed: DIN.
- 11.- OTEO MAZO, C. (1988) Coeficientes de seguridad y control de calidad. En *CEDEX Curso sobre pilotajes y cimentaciones profundas*. Madrid.
- 12.- MINISTERIO DE FOMENTO (2002). Cimentaciones por pilotes de hormigón armado moldeados "in situ". En *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 13.- SOLA CASADO, P.R. (1988) Tipos especiales de pilotes: micropilotes, jet-grouting y elementos portantes. En *CEDEX Curso sobre pilotajes y cimentaciones profundas*. Madrid.
- 14.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Diaphragm walls. PRE-NORMA prEN 1538:2008.*
- 15.- ACHE (2002). *Hormigones de ejecución especial (seis tipos)*. Madrid: Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- 16.- MINISTERIO DE FOMENTO (1982). *Cimentaciones. Contenciones. Pantallas. Norma Tecnológica de la Edificación: NTE-CCP*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 17.- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1989). *Hormigón*. Madrid: E.T.S. Ingenieros de Caminos.
- 18.- MINISTERIO DE FOMENTO (2002). Pantallas continuas de hormigón armado moldeadas "in situ". En *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 19.- AYUNTAMIENTO DE MADRID (1999). *Pliego de Condiciones Técnicas Generales*.
- 20.- MINISTERIO DE FOMENTO (2008). *Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.

5. CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

5.1 Introducción

El hormigón para cimentaciones especiales, tal como se ha indicado de forma reiterada en capítulos anteriores, debe presentar unas características determinadas que permitan su colocación mediante las específicas condiciones de puesta en obra que suelen utilizarse en estas aplicaciones, consiguiendo un hormigón compacto, continuo y con las propiedades exigidas.

En el Capítulo 3 se han establecido los requisitos básicos que deben cumplir los materiales a emplear para obtener estos hormigones de características especiales. Asimismo su correcta dosificación establece como datos de partida la obtención de una determinada consistencia del hormigón fresco y de la resistencia establecida en proyecto para el hormigón endurecido, consiguiendo un hormigón de elevada docilidad para su puesta en obra.

En este Capítulo se detallarán las características que debe presentar el hormigón de cimentaciones especiales, ampliando y completando lo anteriormente comentado, y exponiendo las indicaciones recogidas en las principales normas españolas sobre la materia (Instrucción EHE, Código Técnico de la Edificación, PG3 y normas UNE) y algunas recomendaciones y normas internacionales (FHA, AFNOR).

5.2 ASPECTOS GENERALES

El hormigón para cimentaciones especiales debe ser capaz de fluir rellenando cualquier parte del pilote o muro-pantalla, pasando a través de las armaduras por la simple acción de su propio peso, sin ningún otro método de compactación; sin segregarse ni quedar bloqueado en las armaduras, lo que originaría defectos importantes como: bolsas, coqueras, juntas, falta de continuidad, etc¹. De forma habitual, se debe poder bombear, verter o colocar mediante tubo Tremie por gravedad hasta el fondo de la excavación y debe desplazar los lodos bentónicos o el agua al ascender por la perforación².

Por todo lo anterior, el hormigón adecuado debe poseer alta plasticidad y cohesión, buena fluidez, capacidad de autocompactación y suficiente trabajabilidad durante todo el proceso de vertido, incluida la retirada, en su caso, de entubados provisionales⁴. Parte de estas características se cumplen de manera inherente por los hormigones autocompactantes, aunque los detalles relacionados con su fabricación, el control de la consistencia y otros aspectos son objeto de un capítulo específico (Capítulo 8).

En definitiva, en el hormigón de cimentaciones especiales es esencial una elevada y continuada docilidad del hormigón fresco, ya que debe fluir a través de las armaduras y compactarse sin ayuda de una vibración externa.

5.3 DOCILIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO

Se entiende por un hormigón dócil aquél que se transporta, se coloca en obra y se compacta con facilidad y sin segregarse. Un hormigón dócil presenta las siguientes características:



- Una consistencia adecuada que le permite rellenar perfectamente los encofrados, envolviendo las armaduras y que cierra bien eliminando los huecos de la masa cuando se le aplica una mínima compactación.
- Una elevada cohesión que impida la segregación durante su manejo.

La docilidad, asimismo, depende de los medios de puesta en obra y compactación aplicados, que deben ser adecuados a la consistencia del hormigón colocado.

Se puede mejorar la docilidad del hormigón con una correcta selección de sus materiales componentes y una dosificación ajustada. Así, algunos factores que favorecen la docilidad son la utilización de áridos rodados, tamaños máximos reducidos, presencia de suficiente contenido de finos, granulometrías continuas; y dosificaciones con altos contenidos de cemento e incorporando aditivos plastificantes o superplastificantes. Todos estos aspectos son habituales en los hormigones de cimentaciones especiales y han sido tratados de forma detallada en el Capítulo 3. La disponibilidad de áridos rodados es cada vez menor, por lo que cada vez se usa más el árido machacado, en cuyo caso es recomendable lavarlo para eliminar el polvo, especialmente el de naturaleza arcillosa, ya que éste retiene agua y afecta negativamente a la consistencia.

La docilidad del hormigón fresco es un requisito necesario en cualquier proceso de ejecución en obra, pero aún lo es más para el caso del hormigón en cimentaciones especiales, ya que existen numerosos condicionantes en su puesta en obra que dificultan la ejecución y aumentan los riesgos de segregación, aspectos que pueden salvarse con la utilización de un hormigón especialmente dócil. Algunos de estos condicionantes son: la colocación del hormigón por gravedad mediante tuberías Tremie de pequeño diámetro y a grandes profundidades, puesta en obra de forma continua sin posibilidad de compactación, ejecución del hormigonado en muchos casos bajo agua o lodo de perforación, presencia frecuentemente de alta congestión de armaduras.

Aunque es la docilidad del hormigón la propiedad que condiciona los aspectos de ejecución del hormigón y sus resultados finales, debido a la dificultad para controlarla de forma directa, es habitual hacerlo a través de la medida de su consistencia, aunque ésta en sí misma no proporciona una información completa sobre la docilidad, ya que es esencial también conseguir una adecuada cohesión. Así, una dosificación inadecuada, por ejemplo con un contenido excesivo de árido grueso, puede dar lugar a hormigones fluidos con un descenso del cono muy grande, que cumplan con los requisitos de consistencia, pero con problemas de segregación durante la puesta en obra y por tanto no aptos para esta aplicación. En este sentido, y para el caso particular del hormigón de cimentaciones especiales, es fundamental una correcta realización e interpretación del ensayo del cono de Abrams, tal como queda detallado en el apartado siguiente².

5.4 CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN FRESCO

5.4.1 Medida de la consistencia

El ensayo de medida de la consistencia del hormigón más universal, y por supuesto utilizado en nuestro país es el asiento del Cono de Abrams. Este método de ensayo aparece desarrollado en la norma⁹ UNE-EN 12350-2. De acuerdo con dicha norma, el procedimiento de ensayo se esquematiza en los siguientes pasos:

- El molde para conformar la probeta de ensayo debe tener forma de tronco de cono, con las siguientes dimensiones interiores (cono de Abrams):
 - Diámetro de la base: 200 ± 2 mm.
 - Diámetro de la parte superior: 100 ± 2 mm.
 - Altura: 300 ± 2 mm.
- La barra compactadora debe ser de sección transversal circular, recta, fabricada en acero, con diámetro de 16 ± 1 mm y de 600 ± 5 mm de longitud, y con sus extremos redondeados.
- Se debe humedecer el molde y la bandeja base, sobre la que se coloca dicho molde en una superficie horizontal. El molde se debe sujetar firmemente sobre la bandeja base.
- Se llena el molde en tres capas, compactando cada capa con 25 golpes con la barra compactadora y distribuidos uniformemente en la sección transversal. Al compactar las diferentes capas, la barra debe penetrar ligeramente en la capa inferior.
- Después de compactar la última capa, se retira el hormigón sobrante por medio de una acción de corte y rodillo de la barra compactadora.
- Se retira el molde, levantándolo con cuidado en dirección vertical. Esta operación debe realizarse en un tiempo de 5 a 10 segundos, de una manera uniforme, sin causar al hormigón ningún movimiento lateral o de torsión.
- Inmediatamente después de retirar el molde, se debe medir el asentamiento, determinando la diferencia entre la altura del molde y la del punto más alto de la probeta de hormigón asentada.

En cuanto a la interpretación de los resultados, la norma⁹ UNE-EN 12350-2 establece que el ensayo sólo es válido si se produce un correcto asentamiento de la masa de hormigón, es decir, un asentamiento en el cual el hormigón permanece sustancialmente intacto y de forma simétrica (ver Figura 1a). Si se produce una caída lateral de la muestra (Figura 1b), se debe tomar otra muestra de hormigón y repetir el procedimiento. Si dos ensayo consecutivos muestran que una parte del hormigón se desprende de la masa de la probeta de ensayo, el hormigón carece de la necesaria plasticidad y cohesión para que el ensayo de asentamiento sea adecuado.

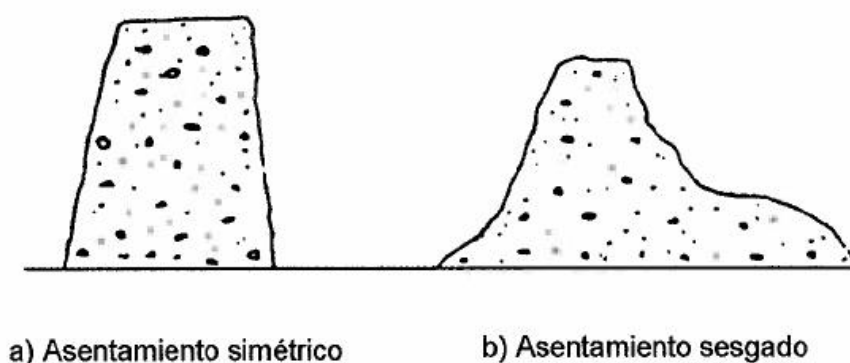


Figura 1: Formas de asentamiento.

Se registra el asentamiento válido ("h" en la Figura 2), redondeado a los 10 mm.

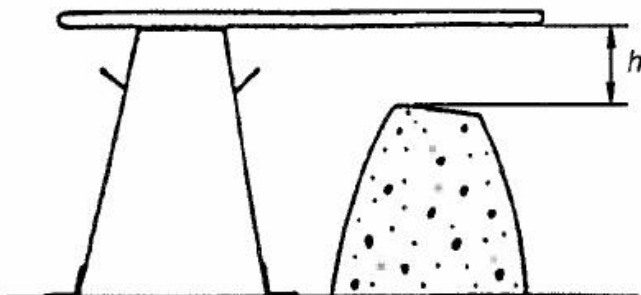
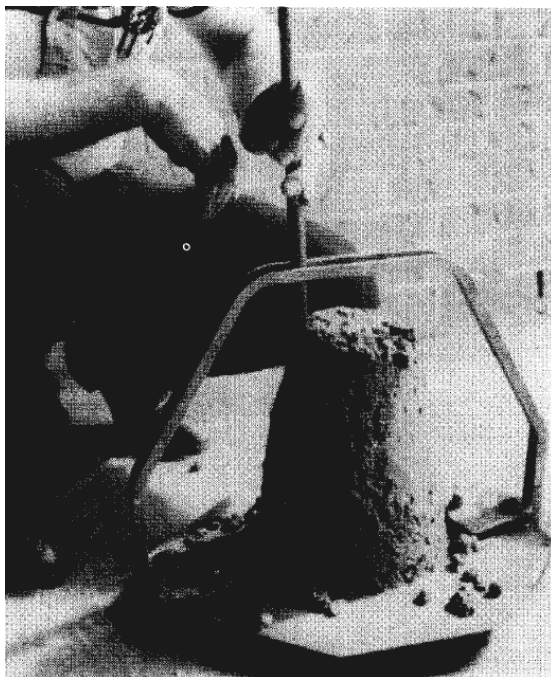
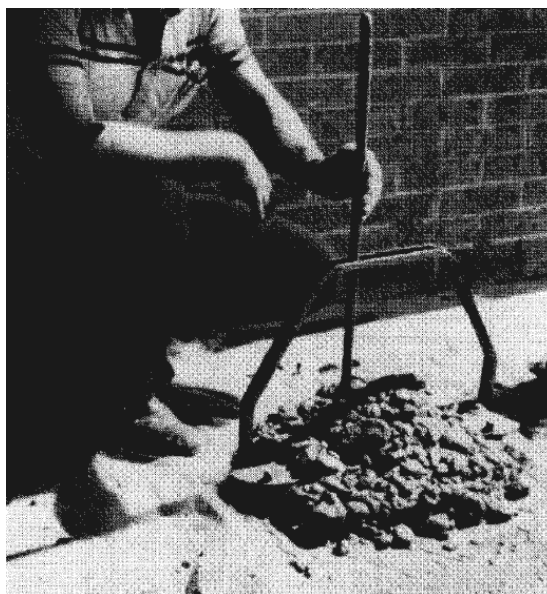


Figura 2: Medida del asentamiento.

A modo de ejemplo, en las siguientes fotografías² se observa un hormigón de inadecuada consistencia (Fotografía 1), de adecuada consistencia pero mala cohesión (Fotografía 2) y de adecuadas consistencia y cohesión (Fotografía 3). Sólo este último se considera un hormigón dócil para su aplicación en cimentaciones especiales.



Fotografía 1: Hormigón de consistencia inadecuada para cimentaciones especiales.



Fotografía 2: Hormigón de consistencia adecuada pero mala cohesión.



Fotografía 3: Hormigón de consistencia y cohesión adecuadas para cimentaciones especiales

La consistencia del hormigón podría también controlarse mediante el ensayo de la mesa de sacudidas, de uso mucho menos frecuente. Con este ensayo (norma UNE-EN 12350-5:06) se mide el esparcimiento del hormigón sobre un plato plano sometido a sacudidas. Para ello, se coloca sobre la mesa de sacudidas un molde con forma de tronco de cono, que se llena con hormigón en dos capas iguales; después de 30 segundos, se eleva despacio el molde verticalmente y, a continuación, se eleva y se deja caer la mesa 15 veces. Finalmente, se mide el diámetro medio (media aritmética de dos mediciones del diámetro paralelas al borde de la mesa) de la masa de hormigón que se ha esparcido sobre la mesa de sacudidas.



5.4.2 Consistencias adecuadas para el hormigón de cimentaciones especiales

Los hormigones para cimentaciones especiales en general se colocan con consistencia muy fluida (asientos de cono superiores a 150 mm), lo cual obliga habitualmente a utilizar en la dosificación aditivos superplastificantes.

Así, el PG3⁵ específicamente exige valores de consistencia para el hormigón fresco entre 150 y 200 mm de asiento del cono de Abrams para hormigón colocado en condiciones de inmersión mediante tubo-Tremie o bombeo.

En el caso de pilotes, la norma EN 1536 recomienda las siguientes consistencias³:

Asientos en cono de Abrams (mm)	Condiciones típicas de uso (ejemplos)
$130 \leq H \leq 180$	- hormigón vertido en seco
$160 \leq H \leq 210$	- hormigón bombeado, o bien - hormigón sumergido, vertido bajo agua con tubo-Tremie
$180 \leq H \leq 220$	- hormigón sumergido, vertido bajo fluido estabilizador con tubo-Tremie
NOTA – los valores medidos del asiento (H) tienen que ser redondeados a los 10 mm	

De acuerdo con dicha norma, la consistencia del hormigón podría también controlarse mediante el ensayo de la mesa de sacudidas, en cuyo caso el escurrimiento debería encontrarse entre 460 y 530 mm para vertido en seco, entre 530 y 600 mm para hormigón bombeado o sumergido bajo agua, y entre 600 y 630 mm para hormigón sumergido bajo lodo³.

La publicación de la Federal Highway Administration², específica para pilotes, simplifica mucho sus recomendaciones en cuanto a las consistencias adecuadas, aconsejando un asiento del cono de unos 150 mm cuando se utiliza el vertido en seco, y 200 mm en el resto de los casos.

Análogamente, para muros-pantalla, la norma EN 1538 recomienda las siguientes consistencias⁶:

Asientos en cono de Abrams (mm)	Condiciones típicas de uso (ejemplos)
$130 \leq H \leq 180$	- hormigón vertido en seco
$180 \leq H \leq 220$	- hormigón sumergido, vertido bajo fluido estabilizador con tubo-Tremie
NOTA – los valores medidos del asiento (H) tienen que ser redondeados a los 10 mm	

En referencia al ensayo de la mesa de sacudidas, la misma norma indica que el escurrimiento debería encontrarse entre 460 y 530 mm para vertido en seco, y entre 600 y 630 mm para hormigón sumergido bajo lodo⁶.

Por tanto, y de acuerdo con las consideraciones anteriores, en la práctica habitual del hormigonado de cimentaciones especiales se utilizan asientos superiores a 150 mm. Estos asientos, de acuerdo con la actual Instrucción EHE⁷ (artículo 31.5) corresponden a hormigones de consistencia líquida (L). La Instrucción no permite la utilización de consistencias líquidas, salvo que se consigan mediante el empleo de aditivos superplastificantes, como es el caso en cimentaciones especiales.

Otro aspecto importante en la colocación es asegurar que la docilidad y fluidez del hormigón se mantienen durante todo el proceso de hormigonado, para garantizar que no se produzcan fenómenos de atascos en el tubo Tremie, discontinuidades en el hormigón o bolsas de hormigón segregado o mezclado con el lodo de perforación⁴. Al determinar el período de trabajabilidad del hormigón en ensayos previos, deberán tenerse en cuenta posibles interrupciones de suministro, así como el tiempo necesario para el vertido, incluyendo en su caso la extracción del entubado provisional³. Así, se considera adecuado comprobar que la consistencia del hormigón que se va a colocar mantenga aún un cono de Abrams no inferior a 100 mm después de cuatro horas, aspecto que expresamente recogen las normas europeas de cimentaciones^{3,6}.

5.5 EXUDACIÓN DEL HORMIGÓN FRESCO

La exudación es una forma de segregación en la que parte del agua de amasado asciende a la superficie del hormigón fresco¹⁰.

La exudación se debe a la incapacidad de los constituyentes sólidos de la mezcla para retener toda el agua de amasado, y decantar éstos por la fuerza de la gravedad; la exudación acumula agua en superficie y continúa hasta que la pasta de cemento endurece lo suficiente como para finalizar este proceso de sedimentación¹⁰.

La exudación puede deberse a la utilización de una consistencia inadecuada (demasiado fluida), una cantidad excesiva de partículas grandes de árido grueso, una mala puesta en obra y una mala compactación. Una causa frecuente suele ser la presencia en la dosificación de pocos finos: bajos contenidos de arena y cemento o utilización de una arena de granulometría inadecuada¹¹. Aunque también influye el contenido de agua de la mezcla, la exudación depende sobre todo de las propiedades del cemento. La exudación es menor en cementos más finos y



cuando el cemento tiene un elevado contenido de alcalinos o de AC_3 . Las mezclas más ricas en cemento son menos propensas a la exudación y además se consigue reducirla mediante la utilización de diferentes adiciones¹⁰: el filler calizo y las adiciones puzolánicas tales como las cenizas volantes y el humo de sílice. Asimismo, los aditivos plastificantes y superplastificantes tienen como función secundaria reducir el riesgo de exudación. También los aireantes la reducen de forma notable.

Para el caso específico del hormigón para cimentaciones especiales, las dosificaciones habituales utilizadas, tal como han sido descritas en el Capítulo 3, no deberían ser propensas a la exudación, al utilizarse elevados contenidos de cemento, arenas con alto contenido en finos y gravas con tamaño máximo reducido. Por otra parte, aunque en estos hormigones es habitual utilizar consistencias muy fluidas, éstas se consiguen mediante la utilización de aditivos superplastificantes. El único aspecto a considerar es la utilización de cementos de baja categoría resistente (32,5), que al resultar menos finos sí podrían ser origen de una posible exudación, por lo que en tal caso una posible opción es seleccionar cementos con adiciones, siendo también factible añadir éstas directamente a la mezcla.

El fenómeno de la exudación del hormigón no debe ser minimizado, ya que como resultado de la misma, diversos aspectos en las propiedades del hormigón se ven negativamente afectados, tal como se describe seguidamente.

Así, y en el caso de una puesta en obra convencional, la capa superior de cada tongada de hormigón aumenta su relación a/c, por lo que se crea una zona de hormigón poroso y de baja durabilidad. Si por el contrario el agua exudada se vuelve a mezclar mediante un acabado de la superficie, se formará una superficie débil; esto se puede evitar retrasando las operaciones de acabado hasta que el agua exudada se haya evaporado. Por otro lado, si la evaporación de agua en la superficie del hormigón es mayor que la exudación y no se aplica un curado por agua, podría desarrollarse una fisuración superficial en mapa por retracción plástica. En ocasiones, si el agua arrastra muchas partículas finas de cemento, se formará una capa de lechada superficial, que siempre debe ser eliminada (mediante cepillado) porque supone un plano débil entre tongadas o una superficie visible que es porosa y quebradiza¹⁰.

En el caso de cimentaciones especiales, al tratarse de un hormigonado en profundidad y realizado de forma continua, el agua exudada no llega a acceder a la superficie, acumulándose en las superficies laterales del elemento, pudiendo ocasionar el mismo efecto de creación de una zona de hormigón de peor calidad antes descrito.

Además de acumularse en la superficie exterior del hormigón, parte del agua exudada puede quedar atrapada bajo las partículas de árido grueso o de la armadura, creando entonces zonas de mala adherencia.

Otro efecto adverso es la formación de capilares en el interior del hormigón originados por el agua exudada, que al evaporarse y quedar vacíos aumentan su permeabilidad, comprometiendo la durabilidad en ambientes agresivos.

También se pueden formar fisuras por asentamiento plástico del hormigón, que se desarrollan sobre los elementos que impiden un asentamiento uniforme, como por ejemplo las armaduras, partículas grandes de árido o un cambio de sección del elemento que se hormigona monolíticamente¹⁰.

Para evitar todos los defectos citados, la mejor medida está en la prevención, por lo que puede ser conveniente que en los ensayos previos en laboratorio se compruebe si la dosificación adoptada origina exudación, y en su caso reajustarla para impedir que se produzca.

5.6 CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Las características específicas de los hormigones para cimentaciones especiales, que requieren la selección de materiales adecuados y dosificación, no afectan sin embargo a las propiedades finales del hormigón endurecido, que son las mismas que se obtienen con hormigones armados convencionales utilizados en otros elementos estructurales, por lo que en este aspecto son directamente de aplicación los requisitos incluidos en la Instrucción EHE. Seguidamente se revisarán algunos de los aspectos más relevantes de dichos requisitos referentes a las propiedades del hormigón endurecido.

5.6.1 Resistencia a compresión

En cuanto a la resistencia del hormigón, la Instrucción EHE⁷ establece como resistencia mínima en aplicaciones de hormigón armado la categoría HA-25. En la práctica habitual es ésta la categoría utilizada, aunque en ocasiones se utilizan también las categorías HA-30 y HA-35 por condicionantes de durabilidad. A los efectos de la Instrucción EHE, la resistencia a compresión se refiere a la resistencia de la unidad de producto o amasada y se obtiene a partir de los resultados de ensayo a rotura a compresión (según la Norma UNE EN 12390-3:2003), en número igual o superior a dos, realizados sobre probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, de 28 días de edad, fabricadas y curadas según la Norma UNE-EN 12390-2:2001. El control de la resistencia del hormigón de obra se aplicará al número necesario de amasadas por lote, determinando su resistencia característica estimada y comprobando que iguala o supera la exigida en proyecto.

La norma europea EN 1536 indica que el rango habitual de clases de resistencia para pilotes está entre la C 20/25 y la C 45/55 (es decir, entre 20 y 45 N/mm² de resistencia característica en probeta cilíndrica), aunque también se puede utilizar hormigón de mayores resistencias, o incluso menores para los pilotes primarios de las pantallas de pilotes³.

5.6.2 Resistencia a tracción

En cuanto a la resistencia a tracción, si no se dispone de resultados de ensayos, se puede admitir que la resistencia característica inferior a tracción $f_{ct,k}$ (correspondiente al cuantil del 5%, y que es la que utiliza por defecto la Instrucción EHE en todo su articulado) viene dada por la fórmula⁷: $f_{ct,k} = 0,21 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$. En cambio, la resistencia media a tracción $f_{ct,m}$, que se utiliza para el cálculo de la abertura máxima de fisura admisible, se obtiene mediante: $f_{ct,m} = 0,30 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$, siendo f_{ck} la resistencia característica de proyecto.

5.6.3 Módulo de elasticidad

En el apartado 6.3.1.2. del capítulo SE-C del Código Técnico de la Edificación, referente a los estados límites de servicio de los elementos de contención, se establece que, en el cálculo de los estados límite de servicio, la deformabilidad adoptada para los materiales debe evaluarse tomando en consideración su nivel de deformación, y que debe efectuarse una estimación



conservadora de las deformaciones y desplazamientos de los elementos de contención y de su efecto en estructuras y servicios próximos⁴.

Para el cálculo de deformaciones, y a partir de la resistencia característica a compresión del hormigón a 28 días de edad (f_{cm} , en N/mm²), se puede estimar el módulo de deformación longitudinal secante (E_{cm} , en N/mm²) mediante la expresión:

$$E_{cm} = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}}$$

válida siempre que las tensiones, en condiciones de servicio, no sobrepasen el valor de $0,40f_{cm}$. Para evaluar el módulo de deformación a edades diferentes a los 28 días, hay que tener en cuenta que el crecimiento del módulo con la edad no es igual al que experimenta la resistencia a compresión. Dicha evaluación más precisa puede realizarse a partir de la siguiente expresión:

$$E_{cm}(t) = \left[\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right]^{0,3} E_{cm} \quad , \text{ donde:}$$

$E_{cm}(t)$ es el módulo de deformación secante a los t días.

E_{cm} es el módulo de deformación secante a los 28 días.

$f_{cm}(t)$ es la resistencia media a compresión a los t días.

f_{cm} es la resistencia media a compresión a los 28 días.

En todo caso, el módulo de deformación longitudinal del hormigón tiene una marcada dependencia del tipo de árido con el que se ha fabricado el hormigón, pudiendo experimentar importantes variaciones incluso para la misma resistencia, por este factor. Es por ello que la Instrucción EHE incluye en comentarios un factor corrector " α " del módulo de deformación en función de la naturaleza del árido⁷.

5.6.4 Retracción

Otra de las propiedades importantes del hormigón endurecido es su deformación de retracción, es decir, la contracción que se presenta durante el fraguado y primera época del endurecimiento del hormigón, originada fundamentalmente por la desecación del hormigón, al evaporarse el agua de amasado que no se ha combinado químicamente con el cemento¹.

En el valor final de la retracción del hormigón influyen en especial los siguientes factores:

- Condiciones ambientales: en ambientes húmedos el hormigón apenas sufre desecación por lo que el fenómeno de la retracción es menor que en zonas secas.
- Dimensiones: Influye la superficie que tiene el elemento en contacto con el ambiente exterior, ya que si es reducida su desecación será menor y también menor su deformación de retracción. En concreto, en elementos de cimentación enterrados no existe superficie en contacto con la atmósfera por lo que la retracción será nula.
- Factores relacionados con la dosificación¹.
 - El contenido y la finura del cemento aumentan la retracción del hormigón.
 - Si el hormigón se fabrica con un contenido bajo de agua, se reducirá su retracción.
 - El hormigón con más contenido de pasta y menos volumen de áridos tiene

más retracción. En este sentido, los tamaños máximos grandes, que permiten dosificar hormigones con poco contenido de pasta, originan hormigones de menor retracción. También hay que cuidar que el árido no aporte finos arcillosos al hormigón, ya que éstos son origen de fuertes retracciones en el hormigón.

- Curado: El curado proporciona una notable mejora de la resistencia a tracción del hormigón, permitiendo que pueda superar las tensiones originadas por la retracción sin fisurarse.
- En cuanto a la evolución en el tiempo de la retracción, este fenómeno se desarrolla gradualmente en el tiempo. Aunque son muchos los factores que influyen en la evolución de la retracción del hormigón, como orden de magnitud se puede estimar que en dos semanas se produce el 25% de la retracción a tiempo infinito, en 3 meses ya se ha producido la mitad, y en un año el 80% de la retracción final que tendrá la pieza¹.

Tal como se ha indicado anteriormente, la retracción no es un fenómeno frecuente en elementos de cimentaciones especiales, pero si fuera necesario realizar la estimación de esta deformación, siempre puede evaluarse mediante la formulación recogida por la Instrucción EHE, y que recoge parámetros que dependen de los factores anteriormente citados⁷:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

donde:

- ε_{cd} es la deformación de retracción por secado, que se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo: $\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t - t_s) \cdot k_e \cdot \varepsilon_{cd,\infty}$
- ε_{ca} es la deformación de retracción autógena, que se desarrolla durante el endurecimiento del hormigón: $\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca,\infty}$
- t es la edad del hormigón en el instante de evaluación, en días.
- t_s es la edad del hormigón al comienzo de la retracción, en días.
- β_{ds} es el coeficiente de evolución temporal que se obtiene a través de la siguiente

fórmula: $\beta_{ds}(t - t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0,04\sqrt{e^3}}$, siendo:

- e es espesor medio, en mm. $e = \frac{2 \cdot A_c}{u}$
- A_c es el área de la sección transversal.
- u es el perímetro en contacto con la atmósfera.
- k_e es el coeficiente que depende del espesor medio, según la siguiente tabla:

e (mm)	k_e
100	1,00
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70



CEDEX

- $\varepsilon_{cd,\infty}$ es el coeficiente de retracción a tiempo infinito, que se obtiene como:

$$\varepsilon_{cd,\infty} = 0,85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{10}\right) \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{HR}, \text{ siendo:}$$

- para estructuras al aire ($HR < 99\%$): $\beta_{HR} = -1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{HR}{100} \right)^3 \right]$
- para estructuras sumergidas: $\beta_{HR} = 0,25$
- HR es la humedad relativa en tanto por ciento.
- α_{ds1} y α_{ds2} dependen de la velocidad de endurecimiento del cemento, según la siguiente tabla:

	Endurecimiento lento	Endurecimiento normal	Endurecimiento rápido
α_{ds1}	3	4	6
α_{ds2}	0,13	0,12	0,11

- $\varepsilon_{ca,\infty} = -2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$
- $\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2t^{0,5})$
-

5.6.5 Fluencia

Aparte de la retracción, otra deformación diferida que puede experimentar el hormigón es la ocasionada por la fluencia, cuando se encuentra sometido a tensiones de compresión elevadas y constantes en el tiempo. El origen de la fluencia, al igual que en el caso de la retracción, está relacionado con la pérdida de agua del hormigón, pero en este caso por efecto de la tensión aplicada. Algunos de los factores citados que aumentan la deformación de retracción, también aumentan la deformación de fluencia: las condiciones ambientales secas, la superficie en contacto con el ambiente exterior o los aspectos mencionados de dosificación. Adicionalmente la fluencia que experimenta el hormigón aumenta con el nivel de tensión aplicado y disminuye si se retrasa la edad de puesta en carga.

No es habitual el cálculo de deformaciones de fluencia en cimentaciones especiales, pero en tal caso puede estimarse en el instante "t" (en días), para una tensión constante $\sigma(t_0)$, menor que $0,45f_{cm}$ y aplicada en "t₀" (en días), mediante la siguiente expresión, de acuerdo con la Instrucción EHE⁷:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma(t_0) \cdot \left(\frac{1}{E_{c,t_0}} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{c,28}} \right)$$

donde el primer sumando del paréntesis representa la deformación instantánea para una tensión unidad, y el segundo la de fluencia, siendo:

- $E_{c,28}$ es el módulo de deformación longitudinal inicial del hormigón a los 28 días de edad.

- E_{c,t_0} es el módulo de deformación longitudinal inicial del hormigón en el instante t_0 de aplicación de la carga
- $\varphi(t, t_0)$ es el coeficiente de fluencia.

5.6.6 Permeabilidad

Finalmente, y en cuanto a las propiedades físicas de un hormigón endurecido, el control de su permeabilidad proporciona una garantía de comportamiento adecuado en ambientes agresivos en general, al estar íntimamente relacionada con su durabilidad. La permeabilidad es la facilidad con la que un fluido avanza a través de la red porosa de un material, cuando entre sus caras se mantiene una diferencia de presión. El caso más frecuente en el hormigón es el control de su permeabilidad al agua, y en este caso se evalúa de acuerdo con la ley de Darcy, cuya expresión

es: $K_w^* = Q \frac{l}{A h}$, donde:

K_w^* : coeficiente de permeabilidad (m/s)

Q : caudal (m³/s)

l : espesor del elemento penetrado por el agua (m)

A : área del elemento penetrado por el agua (m²)

h : presión de agua (m)

Esta es la expresión que se aplica para evaluar el coeficiente de permeabilidad al agua, según el procedimiento de ensayo UNE 83.310, en hormigones de alta o media permeabilidad.

Según el Bulletin 243 CEB-FIP¹², se puede estimar la calidad del hormigón a partir de los resultados del ensayo de permeabilidad, según lo indicado en la siguiente tabla.

Calidad del hormigón	Permeabilidad	
	Evaluación	Criterio
Buena	Baja	$K < 10^{-12}$ m/s
Media	Media	$10^{-10} < K < 10^{-12}$ m/s
Mala	Alta	$K > 10^{-10}$ m/s

La realización del ensayo directo de permeabilidad resulta complicado de ejecutar en un hormigón de buena calidad poco poroso y poco permeable, lo que justifica que la Instrucción EHE aplique como control de la permeabilidad en hormigones estructurales el ensayo de penetración de agua bajo presión (Norma UNE-EN 12390-8), de más sencilla realización, que además se utiliza para validar las dosificaciones adoptadas para hormigones situados en ambientes agresivos, tal como se explicará con detalle en el siguiente capítulo.



La permeabilidad del hormigón está ocasionada fundamentalmente por los poros accesibles que contiene, y en particular por los poros capilares generados por la evaporación del agua de amasado que no se ha combinado químicamente; y por los macroporos, huecos generados por una dosificación de cemento insuficiente, mala granulometría, deficiente compactación, problemas de segregación, etc.

Para reducir la permeabilidad del hormigón se debe actuar por diferentes vías:

- Disminuir la relación agua/cemento, ya que el hormigón resultante tendrá menos volumen de poros capilares.
- Aumentar la compacidad del hormigón. Esto se consigue incrementando el contenido de cemento, para que haya suficiente pasta para envolver y rellenar los huecos entre los granos del árido. También con un proceso de compactación adecuado.
- Curando bien el hormigón, para conseguir taponar poros capilares con nuevos productos de la hidratación, y de esta manera convertirlos en inaccesibles y por tanto impermeables al paso del agua.

En el caso particular de los muros pantalla, incluso ejecutados con un hormigón compacto de baja permeabilidad no se puede exigir una perfecta estanqueidad. Funcionalmente, se trata de elementos constructivos no completamente estancos por lo que el proceso de ejecución de este tipo de estructuras implica que puedan producirse filtraciones en puntos singulares como las juntas de construcción. En condiciones normales no se pueden evitar manchas de humedad en la superficie de la pantalla.

En cualquier caso, el diseño de la pantalla debe garantizar que no se producen entradas de agua inadmisibles a través del propio hormigón, de las juntas de construcción, o por debajo de la estructura de contención, así como que no se producen afecciones significativas a la situación de agua freática en el entorno⁴. A este respecto, la norma francesa⁸ NF P 11-221-1 considera una estructura como suficientemente estanca cuando la cantidad de agua que la atraviesa y que se recoge en el drenaje cumple simultáneamente que:

- a) Considerando la estructura en su conjunto:
 - Media anual: $\leq 0,5 \text{ l/m}^2/\text{día}$.
 - Media diaria: $\leq 1,0 \text{ l/m}^2/\text{día}$
- b) Considerando un área rectangular de la estructura de 10 m^2 , en la que la relación entre el lado mayor y el menor no sea superior a 2,5:
 - Media diaria: $\leq 2,0 \text{ l/m}^2/\text{día}$

5.7 Bibliografía

- 1.- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1989). *Hormigón*. Madrid: E.T.S. Ingenieros de Caminos.
- 2.- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1999). *Drilled shafts: construction, procedures and design methods*. Publication N° FHWA-IF-99-025.
- 3.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Bored piles*. PRE-NORMA prEN 1536:2008.
- 4.- Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C. Seguridad estructural. Cimientos (2006).



- 5.- MINISTERIO DE FOMENTO (2002). Cimentaciones por pilotes de hormigón armado moldeados "in situ". En *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*.
- 6.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Diaphragm walls. PRE-NORMA prEN 1538:2008*.
- 7.- MINISTERIO DE FOMENTO (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 8.- AFNOR (2000). *Travaux de bâtiment. Travaux de cuvelage. Partie 1: Cahier des clauses techniques. NORME NF P 11-221-1*. Paris: Ed. AFNOR.
- 9.- AENOR (2006). *Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento. NORMA UNE-EN 12350-2*. Madrid: Ed. AENOR.
- 10.- NEVILLE, A. M. y BROOKS, J.J. (1994) *Concrete Technology*.- Longman Scientific & Technical. London.
- 11.- MEHTA, P. K. y MONTEIRO, P. J. M. (1986). *Concrete. Structure, Properties and Materials* (113-178). Ed. Prentice Hall.
- 12.- CEB (1998). *Strategies for testing and assessment of concrete structures. Guidance Report. Boletín CEB nº 243*. Lausanne, Suiza: Ed. CEB.



6. DURABILIDAD

6.1 Introducción

La Instrucción EHE¹ define la durabilidad de una estructura de hormigón como su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

Se trata, por tanto, de que el hormigón mantenga a lo largo del tiempo unos determinados requisitos de seguridad y funcionalidad, además de un aspecto estético aceptable¹.

La estrategia de la durabilidad del hormigón se basa en identificar la agresividad del ambiente en que se encuentra, para a continuación proyectar la estructura de modo que sea capaz de soportar dicha agresividad ambiental a lo largo del tiempo, sin sufrir una degradación excesiva.

En los siguientes apartados se desarrollará dicha estrategia para el caso de hormigones para cimentaciones especiales, y suponiendo que el hormigón no estará sometido a situaciones de agresividad extraordinaria, fuera de los casos contemplados por la Instrucción EHE, en cuyo caso se precisaría un estudio específico de durabilidad.

En primer lugar se definirán los posibles ambientes agresivos en que pueden encontrarse los hormigones para cimentaciones especiales, y a continuación se detallarán las condiciones que debe cumplir el hormigón situado en cada uno de estos ambientes para alcanzar su vida útil sin una degradación excesiva. La Instrucción EHE garantiza la durabilidad de la estructura mediante el establecimiento de una serie de prescripciones relativas a las propiedades y dosificación de los materiales constituyentes, a la impermeabilidad del hormigón, al espesor de recubrimiento de las armaduras y a la abertura máxima de fisura; finalmente, se pueden aplicar medidas especiales de protección en casos específicos.

Como complemento a lo anterior, el Código Técnico de la Edificación³ señala que se debe proporcionar una adecuada protección del hormigón de cimentaciones especiales contra la agresividad del suelo o de los acuíferos, a través del diseño de la mezcla (aspecto cubierto por la Instrucción EHE) o, en caso contrario, de la utilización de camisas perdidas para el caso particular de pilotes.

En el ámbito internacional, son de referencia las recomendaciones del BRE (British Research Establishment)²⁵, específicas para hormigones en contacto con terrenos agresivos, con un gran nivel de detalle para los diferentes ambientes químicos posibles, y que permiten complementar algunos aspectos no cubiertos por la Instrucción EHE.

6.2 Definición de ambientes agresivos

La Instrucción EHE¹, en su artículo 8, define los diferentes ambientes a los que puede estar sometido un elemento de hormigón. Cada ambiente viene definido por el conjunto de condiciones físicas o químicas a las que el hormigón está expuesto, y que pueden llegar a provocar su degradación. La Instrucción divide los ambientes según que el proceso de deterioro afecte a la corrosión de la armadura o al propio hormigón.



En cuanto a los procesos relacionados con la corrosión de las armaduras, los diferentes ambientes (denominados clases generales de exposición) en que pueden encontrarse los hormigones se recogen en la Instrucción EHE¹, y en su aplicación para el caso específico de cimentaciones especiales quedaría tal como se refleja en la Tabla 1.

Como se observa en la clasificación anterior, salvo para el caso de ambiente interior I, todos los ambientes recogidos se podrían aplicar a pantallas y zonas de pilas-pilote en las diferentes situaciones descritas, mientras que los ambientes IIa, IIIb y IV pueden ser de aplicación a cimentaciones permanentemente enterradas o sumergidas.

Por otro lado, los ambientes relativos a la degradación del propio hormigón (denominados clases específicas de exposición) serían los indicados en la Tabla 2. En general, todo elemento estructural está sometido a una única clase o subclase general de exposición, pudiendo estar o no adicionalmente sometido a alguna de las clases específicas de exposición.

Resulta habitual en la práctica el caso de cimentaciones especiales en las que diferentes zonas del mismo elemento (pilote o pantalla) se encuentran sometidas a distintos ambientes, y sin embargo, al realizarse el hormigonado de forma continua y por simplicidad, se utiliza una dosificación única para todo el hormigón del elemento, que debe corresponder a la más limitativa entre las exigidas para cada ambiente considerado. Es por esto, que en los ejemplos mostrados de cimentaciones especiales en la tabla mencionada, se clasifica directamente el elemento afectado por distintos ambientes dentro del más limitativo de todos ellos.



CEDEX

Tabla. 1. Clases generales de exposición, relativas a la corrosión de las armaduras.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN					
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
no agresiva	normal	I	ninguno	- interiores de edificios, no sometidos a condensaciones	No se da en cimentaciones especiales, ya que la parte enterrada de la cimentación, siempre existente, implica un ambiente como mínimo IIa.
		IIa ⁽¹⁾	corrosión de origen diferente de los cloruros	- interiores sometidos a humedades relativas medias altas (> 65%) o a condensaciones - exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. - elementos enterrados o sumergidos.	Clase de exposición mínima para cimentaciones especiales
marina	normal	IIb	corrosión de origen diferente de los cloruros	- exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm	- cimentaciones especiales situadas en atmósfera exterior con bajas precipitaciones, favorable para la carbonatación del hormigón.
		IIIa ⁽²⁾	corrosión por cloruros	- estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km)	- cimentaciones especiales situadas en atmósfera exterior en las proximidades de la costa.

(Continuación) Tabla. 1. Clases generales de exposición, relativas a la corrosión de las armaduras.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN					
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
	sumergida	IIIb (3)	corrosión por cloruros	- elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar	- cimentaciones especiales en el mar o sumergidas en aguas freáticas marinas.
	en zona de carrera de mareas y de salpicaduras	IIIc (3) (4)	corrosión por cloruros	- elementos de estructuras marinas situadas en la zona de carrera de mareas	- cimentaciones especiales afectadas por las carreras de marea, incluyendo la experimentada por aguas freáticas marinas
	con cloruros de origen diferente del medio marino	IV (5)	corrosión por cloruros	- instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino - superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.	- cimentaciones especiales enterradas en suelos con cloruros - cimentaciones especiales sumergidas o en contacto con agua no marina con cloruros. - cimentaciones especiales en zonas de nieve con riesgo de ser expuestas a sales de deshielo.

(1) Las cimentaciones especiales siempre tienen al menos una zona enterrada, por lo que como mínimo pertenecen a esta clase general de exposición, pudiendo encontrarse clasificadas en otra clase de mayor agresividad, en función del ambiente en el que se encuentre la zona no enterrada de la cimentación, si existiera.

(2) Las cimentaciones especiales de estructuras marítimas situadas por encima del nivel de pleamar tienen siempre zonas sumergidas, y pueden tener también una zona de carrera de mareas, por lo que pertenecen a un ambiente más agresivo: IIIb o IIIc

(3) siempre es además ambiente Qb; (4) puede ser además ambiente E; (5) puede ser además ambiente F.



CEDEX

Tabla 2 Clases específicas de exposición, relativas a otros procesos de deterioro distintos de la corrosión.

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN					
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN A CIMENTACIONES ESPECIALES
química agresiva	débil	Qa	ataque químico	- elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta (ver Tabla 3.)	- cimentaciones especiales en proximidades de áreas industriales, en contacto con aguas o suelos de agresividad débil según tabla 3.
	media	Qb	ataque químico	- elementos en contacto con agua de mar - elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media (ver Tabla 3.)	- cimentaciones especiales de estructuras marinas - cimentaciones especiales en proximidades de áreas industriales, en contacto con aguas o suelos de agresividad media según tabla 3.
	fuerte	Qc	ataque químico	- elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida (ver Tabla 3.)	- cimentaciones especiales en proximidades de áreas industriales, en contacto con aguas o suelos de agresividad alta según tabla 3.
con heladas	sin sales fundentes	H	ataque hielo-deshielo	- elementos situadas en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C*	- cimentaciones especiales sometidas a ciclos de hielo-deshielo, generalmente en zonas de alta montaña.

(Continuación) Tabla 2 Clases específicas de exposición, relativas a otros procesos de deterioro distintos de la corrosión.

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN					
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN A CIMENTACIONES ESPECIALES
	Con sales fundentes	F	ataque por sales fundentes	- elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C	- cimentaciones especiales con riesgo de ser expuestas a sales fundentes.
Erosión		E	abrasión cavitación	- elementos sometidos a desgaste superficial	- cimentaciones especiales situadas en cauces de ríos y torrentes que puedan sufrir socavación - cimentaciones especiales que se encuentren sometidas a fuertes oleajes.

* Que exista una probabilidad superior al 50% de alcanzar al menos una vez al año la temperatura de -5 °C puede suponerse equivalente a que la temperatura media anual sea inferior a 12,5 °C.



CEDEX

El ambiente Q, o de ataque químico, a su vez puede descomponerse en otros tres (Qa, Qb y Qc), según el grado creciente de agresividad del terreno o agua circundantes. La clasificación de la agresividad química del terreno o del agua se indica en la Tabla 3. Teniendo en cuenta que las cimentaciones especiales son habitualmente estructuras enterradas o en contacto con el terreno, si éste o el agua freática que contiene son agresivos, será una clase de exposición relativamente frecuente.

Tabla 3.- Agresividad química del terreno o del agua.

TIPO DE MEDIO AGRESIVO	PARÁMETROS	TIPO DE EXPOSICIÓN		
		Qa	Qb	Qc
		ATAQUE DÉBIL	ATAQUE MEDIO	ATAQUE FUERTE
AGUA	Valor del pH	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	< 4,5
	CO ₂ agresivo (mg CO ₂ /l)	15 - 40	40 - 100	> 100
	Ión amonio (mg NH ₄ ⁺ /l)	15 - 30	30 - 60	> 60
	Ión magnesio (mg Mg ²⁺ /l)	300 - 1000	1000 - 3000	> 3000
	Ión sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /l)	200 - 600	600 - 3000	> 3000
	Residuo seco (mg/l)	75 - 150	50 - 75	< 50
SUELO	Grado de acidez Baumann-Gully (ml/kg de suelo seco)	> 200	(*)	(*)
	Ión sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /kg de suelo seco)	2000-3000	3000-12000	> 12000

(*) Estas condiciones no se dan en la práctica

Se pueden encontrar terrenos con presencia de cloruros de origen no marino (ambiente IV) en algunos suelos con elevado contenido de sales, en particular en terrenos con sulfatos tales como margas yesíferas y yesos.

La presencia de terrenos con sulfatos es relativamente frecuente. Los sulfatos pueden también originarse por oxidación de los sulfuros de hierro, tales como la pirita, por procesos de meteorización, pero que de forma natural en su ambiente se desarrollan a lo largo de miles de años. En cambio, los sulfuros se pueden convertir rápidamente en ácido sulfúrico y sulfatos si quedan expuestos al aire y al agua, por ejemplo a causa de las actividades constructivas o por la presencia de agua circulando²⁵.

Se pueden encontrar aguas con un pH bajo en los efluentes de algunas industrias químicas (aguas con ácido nítrico, hidróclórico o sulfúrico, por ejemplo) o debido a los desechos de comidas (pueden producir ácido acético, fórmico o láctico) o bebidas (los refrescos contienen ácido carbónico)⁹.

Contenidos elevados de ácido carbónico o de ácido húmico también se pueden encontrar en algunas aguas naturales, por ejemplo cuando han estado en contacto con restos de animales o de vegetales. Estos ácidos, sin embargo, no son muy ionizables, por lo que no producirán pH por debajo de 3,5. Otros ácidos minerales, en cambio, son altamente ionizables pero entre ellos, el ácido sulfúrico es el único que se encuentra en el agua natural subterránea. Otro aspecto importante es que las aguas ácidas que se encuentren estancadas tienen un efecto reducido en el hormigón enterrado, siendo especialmente agresivas las aguas ácidas en circulación²⁵. Se recomienda la realización del ensayo de determinación de CO₂ agresivo en las aguas muestreadas en terrenos en que sean elevados los niveles de sustancias orgánicas en descomposición por acción de microorganismos, o en áreas cercanas a zonas industriales con altos niveles de contaminación expuestas a los efectos de la lluvia ácida¹.

Los cloruros y sulfatos de amonio son componentes habituales de los fertilizantes y de la industria agrícola⁹. Por este motivo, la realización del ensayo de determinación de ión amonio se recomienda en las aguas que puedan haber estado en contacto con vertidos residuales de origen industrial, como las de fertilizantes, o de origen urbano, como las aguas de estaciones depuradoras¹.

Los compuestos de magnesio (cloruros, sulfatos o bicarbonatos) se encuentran fácilmente en aguas freáticas, en el agua de mar y en algunos efluentes industriales⁹.

Finalmente, el contenido en residuo seco del agua nos da una idea de su pureza y, por lo tanto, de su capacidad de lixiviación del hormigón; en zonas de alta montaña, por ejemplo, el deshielo puede suponer un incremento de la pureza del agua de los ríos.

Terreno y agua contaminadas pueden constituir un riesgo adicional al reflejado en la tabla anterior de agresividad química; por ejemplo, pueden tener una influencia retardante o inducir cambios en la estructura del hormigón debidos a la presencia de metales pesados⁸.

6.3 Definición de la vida útil de las estructuras

Se entiende por vida útil de la estructura el período de tiempo, a partir de la fecha en que finaliza su ejecución, durante el que deben mantenerse las exigencias básicas (seguridad y funcionalidad estructural, seguridad en caso de incendio e higiene, salud y protección del medio ambiente) en unos límites aceptables. Durante ese período requerirá una conservación normal, que no implique operaciones de rehabilitación¹.

Esta vida útil nominal de la estructura considerada en el Proyecto no puede ser inferior a los valores recogidos en la Tabla 4.



CEDEX

Tabla 4. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructura

Tipo de estructura	Vida útil nominal
Estructuras de carácter temporal	3 – 10 años
Elementos estructurales reemplazables que no forman parte de la estructura principal	10 – 25 años
Edificios agrícolas o industriales y obras marítimas	15 – 50 años
Edificios de viviendas u oficinas y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media	50 años
Edificios de carácter monumental o de importancia especial	100 años
Puentes y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100 años

La vida útil de las cimentaciones, salvo que se trate de elementos provisionales, será en general igual a la de la estructura principal que soportan, o incluso podría ser mayor teniendo en cuenta que su deterioro es difícil de detectar, y además la conservación y/o rehabilitación de las cimentaciones es de muy costosa ejecución.

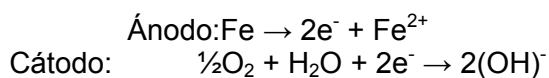
6.4 Procesos de degradación del hormigón y de las armaduras

6.4.1 Corrosión de las armaduras debido a la carbonatación del hormigón

Los elementos de hormigón armado en contacto con el ambiente exterior pueden sufrir un proceso de carbonatación del hormigón, que avanza desde la superficie reduciendo el pH y, al alcanzar las armaduras, puede permitir su corrosión, con mayor o menor gravedad en función de la humedad ambiente (ambientes IIa y IIb). Tal es el caso de las cimentaciones especiales expuestas al ambiente exterior.

Adicionalmente, la Instrucción EHE considera en ambiente IIa específicamente a los pilotes, aunque en este caso la corrosión de la armadura no tiene como origen la carbonatación del hormigón, sino que es la clase mínima de aplicación en estructuras enterradas.

Con carácter general, para que la corrosión del acero en el hormigón se produzca es necesario que se origine una pila electroquímica, cuyo funcionamiento continuado requiere que exista un circuito eléctrico cerrado que incluye el ánodo, el cátodo, la conexión metálica entre ambos y el propio electrolito (el agua). Las reacciones son⁹:



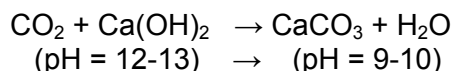
La reacción anódica supone una pérdida gradual de la sección de las barras de acero. Adicionalmente, la transformación del hierro metálico en óxido ($\text{FeO} \cdot (\text{H}_2\text{O})_x$) que tiene lugar tras la reacción anódica, viene acompañada de un incremento de volumen que puede llegar a ser del

600% del tamaño original del metal, lo que se considera la principal causa de la expansión y fisuración del hormigón, con la subsiguiente pérdida del recubrimiento⁹.

Por tanto, la corrosión del acero exige la presencia de agua y oxígeno al nivel de las armaduras. Sin embargo, en condiciones normales el acero embebido en el hormigón se encuentra amparado por una doble protección¹⁰:

- Física: el espesor del recubrimiento de hormigón.
- Química: el pH alcalino del hormigón, con valores habituales de 12-13, provoca que se forme en la superficie del acero una capa protectora de óxido de espesor muy pequeño, que impide la corrosión. Este pH tan elevado del hormigón tiene su origen en la presencia de compuestos de carácter básico, como son el NaOH, el KOH (ambos procedentes de los alcalinos que contiene el cemento) y el Ca(OH)₂ (procedente de la hidratación del cemento pórtland), en la fase acuosa del hormigón.

Esta protección química del acero puede desaparecer por la pérdida de la alcalinidad del hormigón. Una de las causas puede ser cuando por acción del CO₂ del aire, el hormigón se carbonata según la reacci n¹⁰:



La carbonatación penetra en el hormigón como un frente desde las superficies expuestas a la atmósfera, pero no es perjudicial hasta que llega a la armadura. En ese momento, el pH en el entorno de las armaduras cae a 9   10, con lo que se pierde la pasivación y el acero puede corroerse si hay suficiente cantidad de agua y ox geno¹⁰. Por esta razón es deseable utilizar en el hormigón expuesto a este ambiente cementos tipo CEM I, que proporcionan una mayor reserva alcalina que retrasa el avance del frente en comparación con los cementos con adiciones.

El avance del frente de carbonatación permite el desarrollo de una corrosión generalizada de la armadura, en la que el ataque afecta por igual a toda la superficie del metal¹¹. Sin embargo, la gravedad de esta corrosión se considera inferior a la desencadenada por otros tipos de elementos químicos (por ejemplo, los cloruros), lo cual explica los requisitos menos exigentes al hormigón situado en este ambiente, frente a los ambientes III y IV. El ambiente de carbonatación se considera menos agresivo debido a que la velocidad de penetración del CO₂ es normalmente lenta, y a que la corrosión generada supone una reducción de la sección de la armadura que también avanza a una menor velocidad que con otros elementos despasivantes.

La carbonatación penetra hacia el interior del hormigón a una velocidad que sigue una ley del tipo¹⁰: $d = k * t^n$, donde:

d = profundidad de carbonatación (en mm).

k = coeficiente de carbonatación.

t = tiempo (en años).

n = exponente inferior a 1, que a menudo se toma como 0,5.

Se puede obtener una indicación aproximada de la profundidad alcanzada por este frente de carbonatación mediante soluciones indicadoras: se hace visible la alcalinidad rociando una fractura fresca de la superficie del hormigón con una solución de fenolftaleína, que cambia de color en función del valor del pH. Suele distinguir un pH superior o inferior a 8, sea por

carbonatación o por lixiviación. El rápido desarrollo de una coloración rosa indica dónde el hormigón no está carbonatado¹⁰. (ver Figura 1)



Figura 1.- Hormigón armado carbonatado. Manchas de corrosión en la zona de hormigón carbonatada (zona que no ha virado a coloración rosa). Foto cedida por el CEDEX.

La velocidad de carbonatación depende de la permeabilidad del hormigón a la penetración del dióxido de carbono (que está muy influenciada por la relación agua/cemento), la humedad del hormigón y el contenido total de compuestos básicos (Ca(OH)_2 , NaOH y KOH) de los productos de la hidratación. Un hormigón denso, bien compactado y con un buen recubrimiento será muy resistente a la carbonatación¹⁰.

Así, valores de "k" inferiores a 3 mm/ $\sqrt{\text{año}}$, suponen hormigones en los que la carbonatación llega a un máximo de 30 mm (valor del recubrimiento mínimo para el ambiente IIb que figura en la EHE, para una vida útil de 100 años). Este valor de "k" puede obtenerse en hormigones fabricados con cemento pórtland y una relación a/c = 0,55 y un contenido de cemento de 300 kg/m³.

La mayor velocidad de carbonatación se produce para una humedad relativa entre el 60 y el 75%, ya que si es menor no hay suficiente agua para las reacciones químicas, y si es mayor el agua contenida en los poros reduce la velocidad de difusión del dióxido de carbono en el hormigón.

Así, el ambiente II (a y b) de la Instrucción EHE hace referencia a los procesos de carbonatación y como consecuencia la corrosión de las armaduras, y la distinción entre una subclase o la otra se debe a la humedad relativa del ambiente (menor en el caso del ambiente IIb); cuanto menor es la humedad relativa, más fácilmente penetra el dióxido de carbono (y el frente de carbonatación que ocasiona) hacia el interior del hormigón y, por tanto, más agresivo se considera el ambiente, al perderse la protección que el hormigón ejerce sobre las armaduras.

En cualquier caso, a menudo ocurre que, aunque el frente de carbonatación haya llegado hasta la armadura, apenas se observa corrosión; se debe a que la carbonatación avanza más rápidamente para valores intermedios de la humedad, mientras que la corrosión del acero (cuando no hay cloruros u otros iones despasivantes) sólo es significativa si la humedad relativa del ambiente supera el 80%¹⁰. Este es un dato adicional para considerar este ambiente menos agresivo que los ambientes en los que existen cloruros.

6.4.2 Corrosión de las armaduras por la acción de los cloruros

El ambiente III hace referencia a la corrosión de las armaduras por cloruros procedentes del ambiente marino. En ambiente IIIa se encuentran las estructuras que no están en contacto directo con el agua de mar, sino que reciben las sales llevadas por el aire, caso en el que podrían encontrarse las cimentaciones especiales situadas en zonas costeras; por el contrario, en ambiente IIIb se encuentran las estructuras permanentemente sumergidas en agua de mar o enterradas en terrenos saturados con agua de mar, caso de aplicación para pilotes situados dentro o cerca del mar. Por último, el ambiente IIIc de carrera de mareas, corresponde a pilotes y pantallas sometidos a la carrera de marea, o a la experimentada en terrenos con aguas freáticas marinas.

La presencia de cloruros en la solución contenida en los poros del hormigón en torno a la armadura puede provocar roturas localizadas en puntos debilitados de la capa protectora del acero a la que se hacía referencia en el apartado 4.1. El ión Cl^- penetra en la película de óxido, a través de poros u otros defectos, con mayor facilidad que otros iones. Se forman así diminutos ánodos de metal activo (que sufren la corrosión) rodeados por grandes áreas catódicas de metal pasivo (sin corrosión), lo que lleva a la denominación de corrosión localizada o por picaduras¹³. Este tipo de corrosión resulta especialmente grave por varias razones: la velocidad de penetración de cloruros es mayor que la de otros agresivos; y al ser tan grande la zona catódica respecto a la anódica, la corrosión avanza muy rápidamente en esta última. Por otra parte, en una corrosión por picaduras, se puede perder una parte importante de la sección de la barra en puntos localizados, sin que en muchos casos se aprecie en la superficie del hormigón deterioro alguno.



Figura 2.- Corrosión por picaduras. Armadura de un hormigón situado en ambiente marino.
Foto cedida por el CEDEX.

La presencia de cloruros en el interior del hormigón puede tener una procedencia externa o bien estar presentes inicialmente en el hormigón fresco. Entre las fuentes de cloruros en el hormigón fresco se encuentran los aditivos, algunos áridos y el cemento⁷. En este caso, en el hormigón armado se limita el contenido global de cloruros aportado por todos los componentes al 0,4% en peso de cemento¹.

Las principales fuentes de cloruros procedentes del exterior, son las sales fundentes, los suelos con abundantes sales, el agua de mar y el ambiente marino en general. En algunos lugares puede ser un problema el agua subterránea salina y las sales llevadas por el aire⁷. Los cloruros avanzan en el interior del hormigón por difusión, por lo que mediante la 2ª ley de difusión de Fick se puede modelizar su velocidad de penetración. A modo de ejemplo y para el caso del ambiente



menos agresivo (IIla) y una vida útil de 100 años, sería recomendable utilizar un cemento con adiciones, al cual le corresponde un recubrimiento mínimo de 40 mm (Tabla 10, extraída de la Instrucción EHE), una relación a/c = 0,50 y un contenido de cemento de 300 kg/m³ (Tabla 6, extraída de la Instrucción EHE), es decir, mayor recubrimiento y un hormigón de mejor calidad que el necesario en el caso de corrosión de origen diferente de los cloruros (apartado 4.1).

Parte de los cloruros presentes en el hormigón quedan unidos química o físicamente a los minerales del cemento o a los productos de hidratación (por ejemplo, sal de Friedel: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), por lo que sólo resultan peligrosos, en cuanto a la posible corrosión de las armaduras, los cloruros que quedan disueltos en la fase acuosa de los poros. Se considera que los cementos con un bajo contenido en aluminato tricálcico tienen menor capacidad para fijar cloruros¹⁰, por lo que en este ambiente deben utilizarse cementos con un contenido de éste que satisfaga los requisitos de resistencia a sulfatos o agua de mar, pero que mantengan un nivel suficiente de aluminato tricálcico para mejorar la protección de las armaduras frente a la corrosión.

6.4.3 Ataque químico

Bajo el epígrafe de ataque químico se reúnen diversas patologías del hormigón, que se pueden desglosar en tres tipos de procesos: el ataque por sulfatos, el ataque por ácidos y la lixiviación por aguas puras.

6.4.3.1 Ataque por sulfatos

En este ambiente pueden encontrarse cimentaciones especiales situadas en terrenos yesíferos, en contacto con aguas selenitosas o con agua de mar, por ejemplo. El ataque por sulfatos se desencadena por la reacción de los compuestos hidratados del cemento con sulfatos que pueden proceder del ambiente exterior (ataque externo) o estar presentes inicialmente en el propio hormigón (ataque interno).

Los iones sulfato pueden atacar a los compuestos de hidratación del cemento mediante diferentes vías, que se desencadenan en función de la fuente, y su gravedad dependerá de la concentración de iones sulfato (la Instrucción EHE establece tres niveles de agresividad ambiental, ver Tabla 3), así como de la propia composición del hormigón⁶. Los diferentes tipos de ataque se describen a continuación:

- a) Reacción con el aluminato tricálcico hidratado para formar etringita secundaria (con un aumento de volumen del 227%¹⁵), que causa la expansión del hormigón. El hormigón entonces se fisura, permitiendo que penetre más fácilmente el agua, lo que agrava el ataque. Mediante la utilización de cementos de bajo contenido en aluminato tricálcico (cementos SR) se consigue disminuir el ataque por esta vía.
- b) Reacción con el hidróxido de calcio, para producir sulfato cálcico hidratado (yeso dihidrato). La formación de yeso produce expansión ya que precipita aumentando el volumen inicial en un 125%. Se consigue disminuir el ataque por esta vía mediante la

utilización de adiciones minerales puzolánicas, que reducen el contenido de hidróxido cálcico en la pasta hidratada.

- c) Reacción con los silicatos de calcio hidratados (gel de tobermorita) por la actuación específica del sulfato magnésico, con una progresiva pérdida de resistencia y de cohesión. Esta reacción es más agresiva que las anteriores, ya que produce además de yeso, un hidróxido de magnesio que es relativamente insoluble y poco alcalino, que llega a reducir la estabilidad del gel de tobermorita (silicato cálcico hidratado), continuando el ataque hasta la descomposición del hormigón⁹.
- d) En estructuras con hormigón fabricado con cemento SR, si el ataque de sulfatos se da en presencia de carbonatos (por ejemplo hormigones fabricados con arenas calizas, o que hayan utilizado cementos con filler calizo), bajo condiciones de elevada humedad y a temperaturas de entre 0 y 10 °C, puede formarse thaumasita de carácter expansivo, con consecuencias más graves que la formación de etringita, pues igual que en el caso anterior es el silicato cálcico hidratado el que sufre el ataque, lo que puede llegar a desintegrar el hormigón endurecido completamente⁶. Debido a las bajas temperaturas en que se encuentra habitualmente la zona superficial del terreno, se han detectado tras un reciente estudio, bastantes casos de este ataque en cimentaciones en el Reino Unido. El ataque puede también afectar a la zona superior de pilotes y pantallas.
- e) La formación retardada de etringita primaria constituye un ataque interno. En condiciones normales, la etringita primaria se forma durante la hidratación del cemento en hormigones curados a las temperaturas habituales en obra. Sin embargo, esta reacción se retrasa de forma anómala por la exposición a una temperatura alta durante el curado (i.e. > 70 °C) debido a un curado al vapor, al calor de hidratación del cemento en elementos de gran volumen o a ambos. La etringita primaria, en este caso, se sigue formando cuando la pasta de cemento ha endurecido y éste se fisura. Bajo determinadas condiciones, elementos grandes de hormigón pueden sufrir la formación retardada de etringita debido a las elevadas temperaturas alcanzadas en el núcleo del elemento de hormigón durante la hidratación.
- f) Otro tipo de ataque por sulfatos interno se debe a algunos sulfuros de hierro como la pirrotina, marcasita o calcopirita, presentes en algunos áridos, que se oxidan en el interior del hormigón originando un ataque por sulfatos con formación de etringita secundaria y yeso, así como produciendo hidróxidos de hierro, todas ellas reacciones expansivas¹⁶. Este ataque debe evitarse seleccionando áridos que cumplan los requisitos referentes al contenido de sulfuros oxidables de acuerdo con la Instrucción EHE y tal como se recoge en el apartado 5.1.3.1 a) de este capítulo.

Las dos primeras reacciones, la formación retardada de etringita y la presencia de sulfuros de hierro oxidables, suponen la expansión del hormigón endurecido por formación de sales complejas de mayor volumen que los compuestos iniciales, mientras que las otras dos formas de ataque a los silicatos cálcicos hidratados suponen una progresiva pérdida de resistencia y de masa debido al deterioro en la cohesión de los productos de hidratación del cemento.

La reacción química que finalmente tiene lugar y su agresividad, depende también del tipo de sulfato presente en el ataque, siendo los más habituales de calcio (presente en terrenos yesíferos), sodio o magnesio⁶:



- El sulfato cálcico puede considerarse menos agresivo ya que su solubilidad, expresada en gramos de anhídrido sulfúrico por litro de solución, es de 1,2 g SO_3/l , que puede considerarse baja en comparación con otros sulfatos. Ni la etringita ni la taumasita son estables en solución ácida, por lo que un ataque originado por ácido sulfúrico sólo llevará a la formación de yeso²⁵.
- El sulfato de sodio origina etringita así como yeso secundario, ambos expansivos. Además, la solubilidad del sulfato de sodio es de 200 g SO_3/l .
- El sulfato de magnesio se considera el más agresivo, ya que además de dar lugar a los dos componentes expansivos anteriormente citados, ataca al gel de tobermorita, reacción que es especialmente destructiva. Finalmente, la solubilidad de esta sal es también elevada: 150 g SO_3/l .

El agua de mar, a pesar de contener sulfato de sodio y magnesio, no es tan agresiva debido a que los iones cloruro, también presentes en ella, reducen notablemente la acción de los sulfatos¹; por esta razón, en este ambiente se permite usar cementos con adiciones MR con un contenido de aluminato tricálcico algo superior que los equivalentes SR, (ver apartado 5.1.3.1 b).

La Instrucción EHE establece tres niveles de agresividad ambiental (Qa, Qb y Qc) en función del contenido de ión sulfato en el agua o en el suelo (ver Tabla 3).

6.4.3.2 Ataque por ácidos

Se considera que el hormigón sufre un ataque por ácidos al entrar en contacto con una disolución con pH menor que 6,5. Para valores del pH entre 3 y 6, el ataque profundiza a un ritmo aproximadamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo⁶. En este ambiente se pueden encontrar las cimentaciones especiales en contacto con aguas efluentes de algunas industrias químicas, o con aguas carbónicas procedentes de manantiales naturales.

Este ataque origina una reacción ácido-base, formándose una sal más agua; la base que reacciona es fundamentalmente el hidróxido cálcico procedente de la hidratación del cemento, cuya solubilidad aumenta según se reduce el pH de la solución de los poros del hormigón. Por ello, el empleo de adiciones minerales puzolánicas aumenta la protección del hormigón frente al ataque ácido. Si el ataque es muy agresivo, también se pueden producir reacciones destructivas con el resto de los compuestos cálcicos del cemento hidratado. En función de la naturaleza de la sal formada, así serán los efectos del ataque⁶:

- Si se forman sales solubles de calcio, se origina una lixiviación (disolución y migración hacia la superficie de los compuestos de hidratación del cemento), aumentando la porosidad del hormigón. Es el caso de los ataques por ácido clorhídrico (la solubilidad de la sal correspondiente en agua es del 46% en peso), ácido carbónico, ácido nítrico (solubilidad del 56%), ácido acético (solubilidad del 52%), ácido láctico o ácido fórmico (solubilidad del 35%).
- Si se forman sales expansivas (insolubles o en disolución sobresaturada), pueden precipitar en los poros, originando expansión y fisuración del hormigón. Por ejemplo, se producen estas sales ante el ataque por ácido sulfúrico (la solubilidad de la sal correspondiente en agua es del 0,2% en peso).

- Si se forman sales insolubles y no expansivas, éstas precipitarán, originando una colmatación de los poros, mejorando la compacidad del hormigón. Además su formación puede contribuir a la protección de la superficie del hormigón contra el ataque ácido. Este tipo de sales se originan por el ataque de ácidos tales como el fosfórico, el fluorhídrico (la solubilidad de la sal correspondiente en agua es del 0,02% en peso; en pequeñas cantidades actúa como protector del hormigón, pero en grandes puede producir daños), el oxálico (solubilidad del $6,7 \times 10^{-4}\%$), el tánico o el tartárico (solubilidad del 0,037%). También el ácido húmico origina productos de reacción de baja solubilidad en la superficie del hormigón, que impiden que el ataque progrese al interior²⁵.

En el caso de ataque por ácidos, la Instrucción EHE establece tres niveles de agresividad (ambientes Qa, Qb y Qc) en función del pH del agua, pudiendo asimismo existir un ambiente Qa de acuerdo con el grado de acidez Baumann-Gully en el suelo (ver Tabla 3).

6.4.3.3 Lixiviación por aguas puras

En este ambiente pueden encontrarse cimentaciones especiales situadas, por ejemplo, en zonas de alta montaña, donde el deshielo y el agua en el nacimiento de los ríos tiene una gran pureza. El lavado del hormigón consiste en el arrastre por disolución en agua pura o blanda, fundamentalmente del hidróxido cálcico generado en la hidratación del cemento, cuya solubilidad es de 1,6 g/l a 20 °C⁶. Este proceso es aún más nocivo si se trata de aguas carbónicas, en cuyo caso se forma bicarbonato cálcico en el interior del hormigón, sal con una elevada solubilidad.

La agresividad del agua pura radica fundamentalmente en su gran poder de disolución, dando lugar a una pérdida de la reserva alcalina del hormigón, que puede ocasionar problemas de corrosión, así como a un aumento de la porosidad. En casos especialmente graves, se puede llegar incluso a una progresiva descalcificación del gel de tobermorita, aunque en hormigones fabricados con cemento pórtland normal la disolución del hidróxido cálcico es el parámetro fundamental que rige la pérdida de resistencia y el aumento de la porosidad⁶. Por este motivo, en este tipo de ambiente es totalmente recomendable la utilización de cementos que incorporen adiciones puzolánicas, capaces de fijar una gran parte del hidróxido cálcico en el hormigón.

El proceso, cuando se desencadena, empeora progresivamente dado que los capilares por donde se filtra el agua aumentan de tamaño según se produce el proceso de lavado del cemento hidratado. Además, en climas fríos este ataque se ve agravado por la acción de los ciclos de hielo-deshielo⁶.

Para esta situación de lixiviación del hormigón por aguas puras, la Instrucción EHE establece tres niveles de agresividad (ambientes Qa, Qb y Qc) en función del residuo seco en el agua, parámetro relacionado con su poder disolvente (ver Tabla 3). Para el caso de aguas carbónicas que son ligeramente ácidas la agresividad es función del contenido de CO₂ en el agua.

6.4.4 Acción de la helada

El efecto de las bajas temperaturas sobre el hormigón puede ser distinto en función del estado en que se encuentra el material al sobrevenir la helada. En el caso de heladas que afectan al



hormigón durante el proceso de ejecución de la obra, se trataría de un hormigonado en tiempo frío, tal como se detalla en el apartado 4.3.3. del Capítulo 4.

Una vez ejecutada la obra, y en caso de un hormigón que en condiciones de servicio esté sometido a heladas sucesivas en condiciones próximas a la saturación, se considera que se trata de un mecanismo de ataque por "ciclos hielo-deshielo". Este ambiente (denominado H en la Instrucción EHE¹) hace referencia a elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5 °C. En este ambiente pueden encontrarse, por ejemplo, cimentaciones especiales en zonas húmedas y muy frías de alta montaña.

Cuando un hormigón endurecido se encuentra saturado, sus poros se encuentran llenos de agua. Al bajar la temperatura, el agua de los poros se congela, con un incremento de volumen del 9% que origina tensiones que llegan a fisurar el hormigón. En la realidad, el mecanismo de deterioro es más complejo, con la generación de presiones de diversa índole en el interior de los poros capilares⁶, de tal manera que hormigones con grado de saturación por encima del 80% ya sufren deterioros por la acción de los ciclos hielo-deshielo.

La acción del hielo se produce fundamentalmente en la pasta de cemento y tiene un efecto acumulativo: al congelarse el agua en el hormigón, éste se expande; si al deshielo le sigue otra congelación, se produce una nueva expansión, con lo que se produce un efecto semejante al fallo por fatiga. Además cada ciclo abre microfisuras, que se convierten en nuevos caminos de entrada del agua al interior del hormigón. El daño producido por la acción de la helada es superficial, progresando hacia el interior del hormigón según se suceden los ciclos de hielo-deshielo⁶.

También la helada puede afectar a los áridos utilizados en el hormigón, especialmente si se saturan con facilidad por tener una gran absorción. Es por ello que en ambiente de helada (y también en el caso de aplicación de sales fundentes), deben utilizarse áridos en los que se hayan realizado ensayos de comprobación de su resistencia a la helada, tal como se indica en el apartado 5.1.4.

El hormigón puede ser protegido frente a la acción de las heladas mediante la utilización de aditivos oclusores de aire, que ya han sido comentados en el apartado 5.2.4 del Capítulo 3 "Materiales componentes y su dosificación". Cuando la pasta contiene aire ocluido y la distancia entre burbujas del mismo no es demasiado grande (menor de 0,2 mm), éstas interceptan los capilares, actuando como cámaras que permiten la expansión del agua al congelarse, no produciéndose tensiones peligrosas. Aunque la Instrucción EHE sólo obliga a su utilización en hormigones situados en ambiente F, es una medida eficaz de protección también en el ambiente H.

El ambiente F de la Instrucción EHE se refiere igualmente a un ataque del hormigón por heladas, pero en este caso afecta a estructuras situadas en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0° C; por ejemplo, podrían incluirse en este ambiente de exposición las cimentaciones especiales en zonas de alta montaña, en las que se utilizan sales fundentes que pueden llegar a afectar alguna zona expuesta de estos elementos.

El empleo de sales de deshielo hace aún más crítico el efecto de las heladas sobre el hormigón. Al fundirse, el hielo absorbe del propio hormigón el calor latente necesario para la fusión, rebajando con esto considerablemente la temperatura del mismo y dando lugar a la congelación

del agua interna que aún no se hubiese helado. Por otra parte, las sales de deshielo penetran en el interior del hormigón dando lugar a una concentración en sus poros decreciente de la superficie al interior. Si entonces desciende mucho la temperatura, existe una zona superficial del hormigón en la que el agua se congela y una interna en la que ocurre lo mismo; entre ellas queda una zona en la que el agua no se congela debido a su gran concentración en sales. Si la temperatura desciende aún más, el agua de esta capa intermedia empieza a congelarse pero su expansión se encuentra impedida por las dos capas congeladas anteriormente descritas, produciéndose unas tensiones elevadas que pueden provocar una degradación característica en forma de exfoliado de escamas superficiales del hormigón¹⁹.

6.4.5 Erosión

La abrasión del hormigón en su superficie se produce por fricción o percusión ocasionada por otro material. La abrasión de las superficies del hormigón puede ser debida a acciones de tipo mecánico provocadas por el aire o, por el agua, que lleve partículas sólidas en suspensión¹⁹.

Si el hormigón está sujeto a la acción del agua, su resistencia al desgaste va a estar relacionada con la velocidad que posea ésta, la cantidad, tamaño, forma y peso de las partículas que arrastre y la rugosidad superficial del hormigón¹⁹.

Este ambiente (denominado E en la Instrucción EHE) incluiría, por ejemplo, cimentaciones de puente en cauces de ríos y torrentes con riesgo de socavación y cimentaciones expuestas de diques, pantalanos y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidas a fuertes oleajes.

La resistencia del hormigón a la abrasión se debe fundamentalmente al árido grueso, que debe ser especialmente seleccionado en este ambiente por su bajo coeficiente de Los Ángeles, tal como se indica en el apartado 5.1.5, ya que protege la menor resistencia al desgaste del mortero frente a las acciones mecánicas, tanto en el aire como en el agua¹³. También la arena contribuye a mejorar la resistencia a la erosión del hormigón, siendo recomendables arenas de bajo coeficiente de friabilidad, por ejemplo de naturaleza silíceas. En este ambiente debe cuidarse la dosificación del hormigón, no incrementado gratuitamente su contenido de cemento, en detrimento del contenido de árido, componente con mayor resistencia al desgaste. Esto justifica los requisitos del contenido máximo de cemento recogidos por la Instrucción EHE, y señalados en el apartado 5.1.5.

6.4.6 Reacción álcali-árido

El pH de la solución de los poros del hormigón se sitúa entre 12,5 y 13,5, en el que algunas rocas ácidas utilizadas como áridos no permanecen estables con el tiempo. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del hormigón y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel que, al embeber agua, aumenta de volumen⁶.

Del mismo modo, algunas rocas carbonatadas (en concreto, determinadas calizas dolomíticas arcillosas con una textura inusual) participan en reacciones con los álcalis presentes en la solución de los poros del hormigón, produciendo en algunos casos una expansión y fisuración nocivas. Esta patología se denomina reacción álcali-carbonato⁶, aunque hasta el momento su incidencia en España es marginal. Por esta razón, este Capítulo se va a centrar únicamente en la reacción álcali-sílice.



Las reacciones álcali-sílice, por lo tanto, se pueden producir cuando concurren simultáneamente la existencia de un ambiente húmedo (aquellos ambientes cuya clase general de exposición es diferente a I o IIb), la presencia de un alto contenido de alcalinos en el hormigón y la utilización de áridos que contengan componentes reactivos¹.

En el Artículo 28.7.6 de la Instrucción EHE se recoge una lista amplia aunque no exhaustiva de rocas susceptibles de presentar esta reactividad, así como de los minerales constitutivos reactivos (ópalo, calcedonia, etc). Entre los áridos silíceos habitualmente utilizados en la fabricación de hormigones que pueden dar lugar a la reacción se encuentran determinadas cuarcitas, granitos, granodioritas, etc. presentes tanto en áridos rodados como en áridos de machaqueo.

El efecto beneficioso de las adiciones minerales como medida preventiva de este tipo de reacción se basa en diversos efectos, entre los que destaca que estas adiciones se combinan con la portlandita procedente de la hidratación del cemento; al reducirse su contenido en la pasta, también se reduce el pH de ésta, con lo que no se favorece la inestabilidad del árido, causante de la reacción álcali-sílice⁶.

6.5 Protección del hormigón frente a la agresividad ambiental

6.5.1 Materiales constituyentes

6.5.1.1 Corrosión de las armaduras debido a la carbonatación del hormigón

Como norma general, para evitar la corrosión, se prohíbe poner en contacto las armaduras de acero con otros metales de muy diferente potencial galvánico (por ejemplo, tubos de acero galvanizado para ensayos de información⁸), salvo en el caso de sistemas de protección catódica¹. Este aspecto cobra especial importancia al seleccionar el material de los separadores y el alambre de atado de las barras de acero.

En cuanto a la protección frente a la carbonatación, el cemento pórtland sin adiciones es el que proporciona mayor cantidad de reserva alcalina, que supone una protección frente a la carbonatación¹². En cambio, las adiciones minerales puzolánicas fijan el hidróxido cálcico procedente de la hidratación del cemento, por lo que producen hormigones con una menor cantidad de compuestos básicos disueltos en la solución de los poros, y por lo tanto con una menor capacidad de neutralización del CO₂.

Por este motivo, en un ambiente de carbonatación se considera más recomendable la utilización de cementos tipo I sin adiciones, y así lo refleja la Tabla 5 extraída de la Instrucción EHE, en la que para estructuras de hormigón con la misma vida útil se exigen menores recubrimientos al utilizar cementos tipo I. En esta Tabla el valor del recubrimiento sólo es de aplicación en cimentaciones especiales, a efectos del cálculo del ancho de fisura (ver "5.5 Anchura de fisura), ya que los recubrimientos que deben utilizarse para este tipo de obras son específicos, tal como se detalla en el apartado "5.4.1 Recubrimientos". Los cementos recomendados para cimentaciones especiales se encuentran recogidos en el apartado 2 del Capítulo 3.

Tabla 5: Recubrimientos mínimos (mm) para estructuras en ambiente II.

Ambiente	Tipo de cemento	Resistencia (N/mm ²)	Recubrimientos (mm)	
			Vida útil 50 años	Vida útil 100 años
IIa	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	15	25
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
	Otros tipos de cemento o empleando adiciones	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
IIb	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otros tipos de cemento o empleando adiciones	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	35
		$f_{ck} \geq 40$	20	30

Corrosión de las armaduras por la acción de los cloruros

Como se ha comentado en el apartado 4.2, para evitar este tipo de corrosión la normativa normalmente limita el contenido de cloruros inicialmente presentes en el hormigón armado. Así, el contenido total de ión cloro del hormigón está limitado a un máximo del 0,4% en peso del cemento, según el art. 31 de la EHE¹.

Además se establecen limitaciones a la aportación individual al contenido de cloruros de los distintos componentes, de modo que se facilite el cumplimiento del requisito anterior de cloruros totales en el hormigón¹:

- Cemento: $\leq 0,1\%$ (UNE 80.217:1991)
- Agua: ≤ 3 g/l (hormigón armado o con armaduras contra fisuración)
- Áridos: $\leq 0,05\%$ (hormigón armado o con armaduras contra fisuración)
- Cenizas: $\leq 0,10\%$ (UNE 80.217:1991)
- H. sílice: $< 0,10\%$ (UNE 80.217:1991)

En cuanto a la aportación de cloruros desde el ambiente exterior, el ambiente IIIb y IIIc implican un contacto directo del hormigón con el agua de mar, por lo que todo hormigón sometido a estos ambientes además estará expuesto a un ambiente Qb. Por tanto, en los ambientes citados se deben cumplir también las prescripciones indicadas para el ambiente Qb, haciéndose notar que en cuanto al contenido de cemento se refiere, este último siempre es más limitativo. Otros requisitos en estos ambientes marinos incluyen la necesidad de utilizar un cemento resistente a los sulfatos (SR) o al agua de mar (MR).

En cuanto al tipo de cemento, se alcanza una mayor impermeabilidad en los hormigones fabricados con cementos con adiciones que la obtenida en análogas condiciones con cementos pòrtland, lo que hace que el tiempo que tarde el agresivo en llegar a la armadura sea más largo y, por lo tanto, sea muy beneficiosa su utilización para mejorar la durabilidad del hormigón¹². Como conclusión, en este ambiente es recomendable la utilización de cementos II, III y IV que incorporen adiciones puzolánicas o escorias de alto horno, y así lo refleja la Tabla 6, extraída de la Instrucción EHE. En ella se observa que para la misma vida útil son necesarios recubrimientos mayores cuando utilizamos hormigones sin adiciones, ya que en ese caso obtenemos hormigones más permeables que facilitan el ingreso de los cloruros en el hormigón. En esta Tabla el valor del recubrimiento sólo es de aplicación en cimentaciones especiales, a efectos del cálculo del ancho de fisura (ver "5.5 Anchura de fisura"), ya que los recubrimientos que deben



CEDEX

utilizarse para este tipo de obras son específicos, tal como se detalla en el apartado "5.4.1 Recubrimientos". Los cementos recomendados para cimentaciones especiales se encuentran recogidos en el apartado 2 del Capítulo 3.

Tabla 6: Recubrimientos mínimos (mm) para estructuras en ambiente III y IV.

Ambiente	Tipo de cemento	Recubrimientos (mm)	
		Vida útil 50 años	Vida útil 100 años
IIIa	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsílíce > 6% o de cenizas > 20%	25	30
	Resto de cementos utilizables	45	60
IIIb	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsílíce > 6% o de cenizas > 20%	30	35
	Resto de cementos utilizables	40	*
IIIc y IV	CEM III/A, CEM III/B, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsílíce > 6% o de cenizas > 20%	35	40
	Resto de cementos utilizables	*	*

- Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos.
-

Como ya se indicó en el caso de corrosión de origen distinto de los cloruros, para evitar la corrosión, se prohíbe¹ poner en contacto las armaduras con otros metales de muy diferente potencial galvánico (por ejemplo, tubos de acero galvanizado para ensayos de información⁸).

6.5.1.2 Ataque químico

6.5.1.2.1 Ataque por sulfatos

a) Requisitos de protección frente al ataque interno

La protección frente al ataque interno se alcanza mediante una selección adecuada de los materiales constituyentes. Por lo tanto, la normativa establece una serie de requisitos a los materiales componentes del hormigón para garantizar que no se producirá un ataque interno por sulfatos.

La Instrucción EHE¹, en su art. 27, limita el contenido de sulfatos (expresados en SO_4^{2-}) en el agua de amasado a 1 gramo por litro.

Además la Instrucción EHE¹, en su art. 28, establece una serie de limitaciones a la presencia de sulfatos y compuestos totales de azufre en los áridos:

- Compuestos totales de azufre: 1%, expresado como S en % del peso total de la muestra de árido (en escorias de alto horno enfriadas por aire, 2%).
- Sulfatos solubles en ácidos: 0,8%, expresado como SO_3 en % del peso total de la muestra de árido (en escorias de alto horno enfriadas por aire, 1%).
- La diferencia entre compuestos totales de azufre y sulfatos solubles (ambos expresados como SO_3) no debe ser superior al 0,25%.
- En el caso de que se detecte la presencia de sulfuros de hierro oxidables en forma de pirrotina, el contenido total de azufre será inferior al 0,1%⁶.

La Instrucción para la recepción de cementos RC-08 establece un contenido máximo de sulfatos (expresado en SO_3) en el cemento del⁴:

- 3,5% para los cementos tipo CEM I, II, IV y V de clase resistente hasta 42,5 N,
- 4% para todos los del tipo CEM III y para los de clase resistente 42,5 R o superior de los demás tipos.

También las adiciones pueden aportar sulfatos a la reacción, por lo que la Instrucción EHE¹, en su art. 30.1, limita el contenido de anhídrido sulfúrico (SO_3) en las cenizas volantes al 3%.

b) Requisitos de protección frente al ataque externo

Una vez garantizado que no se va a producir un ataque interno por sulfatos gracias a una adecuada selección de los materiales constituyentes, es necesario tener en cuenta la agresividad del terreno y del agua².

La EHE¹ considera que el medio es suficientemente agresivo para el hormigón por su elevado contenido de sulfatos para ser necesaria la utilización de cementos SR resistentes a los sulfatos, cuando el agua contiene más de 600 mg de iones $\text{SO}_4^{2-}/\text{l}$, o el suelo contiene más de 3.000 mg de iones $\text{SO}_4^{2-}/\text{kg}$ de suelo seco (ambientes Qb y Qc, según se observa en la Tabla 3). Sin embargo, si se trata de agua de mar o el contenido de cloruros en el agua es superior a 5.000 mg/l, es suficiente emplear un cemento MR resistente al agua de mar.

Estos cementos tipo SR o MR cumplen las siguientes limitaciones al contenido de aluminato tricálcico (Tabla 7)⁴:



CEDEX

Tabla 7.- Contenido de aluminato tricálcico de los cementos SR y MR (expresado como porcentaje en masa de clínker).

Tipo de cemento	Resistentes a los sulfatos (SR)		Resistentes al agua de mar (MR)	
	C ₃ A%	C ₃ A% + C ₄ AF%	C ₃ A%	C ₃ A% + C ₄ AF%
I	≤ 5,0%	≤ 22,0%	≤ 5,0%	≤ 22,0%
II/A-S; II/B-S; II/A-D; II/A-P; II/B-P; II/A-V; II/B-V; IV/A	≤ 6,0%	≤ 22,0%	≤ 8,0%	≤ 25,0%
III/A	≤ 8,0%	≤ 25,0%	≤ 10,0%	≤ 25,0%
IV/B*; V/A	≤ 8,0%	≤ 25,0%	≤ 8,0%	≤ 25,0%
III/B*; III/C	Lo son siempre		Lo son siempre	

* estos cementos no se recomiendan para cimentaciones especiales, como se indica en el apartado 2 del Capítulo 3.

Los materiales puzolánicos que formen parte de estos cementos resistentes a los sulfatos o al agua de mar (cenizas volantes silíceas, puzolanas naturales y humo de sílice en su caso) deben cumplir además las siguientes prescripciones⁴:

- La relación $\text{SiO}_2/(\text{CaO} + \text{MgO})$, en % en masa, debe ser superior a 3,5, siendo CaO el óxido de calcio reactivo definido en UNE-EN 197/1.
- La ceniza volante silícea o puzolana natural molida a una finura Blaine equivalente a la del cemento de referencia (I 42,5 R/SR), con una tolerancia de $\pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$, y mezclada con éste en proporción cemento/material puzolánico igual a 75/25 en masa, deberá cumplir el ensayo de puzolanidad a la edad de siete días, según UNE-EN 196-5.
- La misma mezcla 75/25 en masa deberá presentar una resistencia a compresión a la edad de 28 días igual o superior al 75% de la resistencia del cemento de referencia (I 42,5 R/SR) a la misma edad (índice de actividad resistente), según el método de ensayo UNE-EN 196-1.

La Instrucción EHE establece tres niveles de agresividad ambiental (Qa, Qb y Qc) en función del contenido de ión sulfato en el agua o en el suelo (ver Tabla 3). Además de la utilización de cementos SR en las clases Qb y Qc, la Instrucción EHE, al fijar los recubrimientos en el ambiente Qa para estructuras de hormigón armado, sólo contempla la posibilidad de utilizar cementos con adiciones, indicando expresamente que con otro tipo de cementos los recubrimientos resultantes serían excesivos (Tabla 8). Este requisito, por coherencia, debería tomarse como medida mínima en los ambientes Qb y Qc de carácter más agresivo, aunque no aparezca expresamente indicado en la Instrucción y para los cuales se indica que debe ser el Autor del proyecto quien fije el recubrimiento mínimo y, en su caso, medidas adicionales. En la Tabla 8 sólo son de aplicación para el caso de cimentaciones especiales los cementos

recomendados y el valor del recubrimiento únicamente a efectos del cálculo de ancho de fisura (ver "5.5 Anchura de fisura). En proyecto y ejecución, los recubrimientos que deben utilizarse para este tipo de obras son específicos tal como se detalla en el apartado "5.4.1 Recubrimientos".

Tabla 8: Recubrimientos mínimos (mm) para la clase específica de exposición Q.

Ambiente	Tipo de cemento	Resistencia (N/mm ²)	Recubrimientos (mm)	
			Vida útil 50 años	Vida útil 100 años
Qa	CEM III, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D o utilizar adición de microsilíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	-	40	55
	Resto de cementos utilizables	-	*	*
Qb, Qc	Cualquiera	-	¥	¥

* Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos.

¥ El Autor del proyecto debe fijar estos valores y, en su caso, medidas adicionales.

En el ámbito internacional y para el caso específico de cimentaciones especiales, el ACI⁵ establece igualmente una protección frente al ataque por sulfatos basada en la limitación del contenido de aluminato tricálcico del cemento, y la agresividad del ambiente:

- Los pilotes de hormigón expuestos a un ambiente con un contenido moderado de sulfatos (suelos con un 0,1 – 0,2% en peso de sulfatos solubles en agua, expresados como SO₄²⁻, o agua que contenga 150 a 1.500 ppm de sulfatos) se deberían fabricar con cemento que no contenga más de un 8% de aluminato tricálcico;
- Los hormigones de los pilotes expuestos a un ambiente severo por sulfatos, se deberían fabricar utilizando un cemento que no contenga más de un 5% de aluminato tricálcico. Si en la zona donde se ejecuta la obra no hay disponible cemento resistente a sulfatos, se puede utilizar un cemento equiparable, como por ejemplo un cemento con menos del 8% de aluminato tricálcico y con un contenido de cenizas volantes del 20%.
- En pilotes expuestos a un ambiente muy severo por sulfatos, se debería fabricar siempre el hormigón con un cemento con adición de cenizas volantes.
- En zonas expuestas al agua de mar, el ACI recomienda fabricar el hormigón con un cemento pórtland que contenga entre un 5 y un 8% de aluminato tricálcico, dado que contenidos menores de aluminato tricálcico aumentan la resistencia a los sulfatos, pero también el riesgo de corrosión de las armaduras.

Otra normativa internacional de especial interés es la publicación especial del BRE (British Research Establishment)²⁵ sobre "Hormigón en terreno agresivo", en la cual se encuentra una compleja y muy detallada definición de ambientes en los que puede encontrarse el hormigón de cimentaciones. En cuanto a la presencia de sulfatos en el terreno o el agua subterránea, la agresividad de éstos se clasifica por el contenido de SO₄ y Mg, así como la presencia de agua estática o en circulación. En ambientes de agresividad moderada podría ser suficiente la utilización de cementos con adiciones y áridos sin restricciones, mientras que con elevada agresividad se exige la utilización de cementos resistentes a sulfatos (para prevenir la formación



de taumasita son especialmente recomendables los cementos con escorias de alto horno), se prohíbe la utilización de cementos con filler calizo, y se exigen áridos con ciertas limitaciones en el contenido de carbonatos, de aplicación a los áridos calizos y dolomíticos. Estos requisitos van encaminados a prevenir un ataque con formación de taumasita, aspecto no contemplado en la Instrucción EHE, pero que conviene tener en cuenta en el caso de cimentaciones.

6.5.1.2.2 Ataque por ácidos

En este ambiente el empleo de cemento pórtland siderúrgico o de cemento pórtland con puzolanas parece ser beneficioso, aunque el comportamiento del hormigón depende más de su calidad que del tipo de cemento empleado¹⁴, por lo que se recomienda un hormigón denso y con baja relación agua/cemento, cumpliendo los requisitos de dosificación recogidos en la Instrucción EHE. Otras formas de fijar el hidróxido cálcico atacable del cemento hidratado consisten en tratamientos con silicato de sodio, con fluorosilicatos de magnesio (rellenan los poros).

Sobre la conveniencia o no de utilizar adiciones minerales existe cierta controversia. Algunos autores consideran que el empleo de cemento pórtland siderúrgico o de cemento pórtland con puzolanas es beneficioso. En los cementos siderúrgicos, al no existir cal liberada, no hay peligro de que sean atacados formando sales cálcicas solubles; en el caso de los cementos puzolánicos, al fijar la cal se obtiene un resultado semejante. Sin embargo, otros autores indican que la presencia de hidróxido cálcico podría representar una defensa frente al ataque de los silicatos hidratados, que sólo son atacados una vez que ya no queda hidróxido cálcico, por lo que el hormigón que mejor se comportaría frente a un ataque por ácidos sería el que contenga cemento pórtland normal, seguido del cemento con escorias de alto horno y, finalmente, el cemento con puzolanas⁶. En este mismo sentido, en ocasiones se han utilizado los áridos calizos como sacrificio para reducir la concentración ácida junto a la superficie del hormigón y disminuir la velocidad de deterioro del hormigón sometido a ataque ácido⁶.

En todo caso y desde el punto de vista normativo la Instrucción EHE, establece tres niveles de agresividad (ambientes Qa, Qb y Qc) en función del pH del agua, pudiendo asimismo existir un ambiente Qa de acuerdo con el grado de acidez Baumann-Gully en el suelo (ver Tabla 3). Al fijar los recubrimientos en el ambiente Qa para estructuras de hormigón armado, sólo contempla la posibilidad de utilizar cementos con adiciones, indicando expresamente que con otro tipo de cementos los recubrimientos resultantes serían excesivos (Tabla 8). Este requisito, por coherencia, debería tomarse como medida mínima en los ambientes Qb y Qc de carácter más agresivo, aunque no aparezca expresamente indicado en la Instrucción y para los cuales se indica que debe ser el Autor del proyecto quien fije el recubrimiento mínimo y, en su caso, medidas adicionales. En la Tabla 8 sólo son de aplicación para el caso de cimentaciones especiales los cementos recomendados y el valor del recubrimiento únicamente a efectos del cálculo de ancho de fisura (ver "5.5 Anchura de fisura"). En proyecto y ejecución, los recubrimientos que deben utilizarse para este tipo de obras son específicos tal como se detalla en el apartado "5.4.1 Recubrimientos".

Las recomendaciones del BRE²⁵, sin embargo, permiten la utilización indistinta de cementos con y sin adiciones en ambientes con pH incluso por debajo de 4,5. Estas recomendaciones señalan expresamente que la velocidad de degradación de la superficie del hormigón por la acción de aguas ácidas naturales está condicionada mucho menos por el tipo de cemento que por la calidad del hormigón utilizado.

En caso de que el hormigón vaya a estar en contacto con agua muy ácida (pH por debajo de 3), habrá que usar algún tipo de protección del hormigón (impermeabilización,...), ya que ningún hormigón puede resistir a largo plazo esa acidez¹⁵. Así, puede recurrirse al empleo de pinturas bituminosas o resinas epoxi que proporcionen una capa protectora. El grado de protección de los diferentes tratamientos varía, pero en todos los casos es fundamental que el recubrimiento del tratamiento quede bien adherido al hormigón, y que no sea dañado por agentes mecánicos¹⁴. En el apartado 5.6 se detallan más estas medidas especiales de protección.

6.5.1.2.3 Lixiviación por aguas puras

En este ambiente, el hormigón debería fabricarse con adiciones puzolánicas (incorporadas directamente en el cemento o bien en obra, al hormigón) que fijen el hidróxido cálcico formado en la hidratación. Además es recomendable emplear cementos de bajo contenido en silicato tricálcico, que generan menor cantidad de hidróxido cálcico¹⁶.

Los hormigones deben ser muy compactos, lo que exige una relación agua/cemento lo más reducida posible y una ejecución cuidada: compactación enérgica y un curado efectivo, para así disminuir aún más la permeabilidad¹⁶.

En proyecto debe estudiarse la existencia de zonas donde pueda verse favorecida la aparición de direcciones predominantes de flujo¹⁶.

Desde el punto de vista normativo, para esta situación de lixiviación del hormigón por aguas puras, la Instrucción EHE establece tres niveles de agresividad (ambientes Qa, Qb y Qc) en función del residuo seco en el agua, parámetro relacionado con su poder disolvente (ver Tabla 3). Para el caso de aguas carbónicas que son ligeramente ácidas la agresividad es función del contenido de CO₂ en el agua. Al fijar los recubrimientos en el ambiente Qa para estructuras de hormigón armado, sólo contempla la posibilidad de utilizar cementos con adiciones, indicando expresamente que con otro tipo de cementos los recubrimientos resultantes serían excesivos (Tabla 8). Este requisito, por coherencia, debería tomarse como medida mínima en los ambientes Qb y Qc de carácter más agresivo, aunque no aparezca expresamente indicado en la Instrucción y para los cuales se indica que debe ser el Autor del proyecto quien fije el recubrimiento mínimo y, en su caso, medidas adicionales. En la Tabla 8 el valor del recubrimiento sólo es de aplicación en cimentaciones especiales a efectos del cálculo del ancho de fisura (ver "5.5 Anchura de fisura"), ya que los recubrimientos que deben utilizarse para este tipo de obras son específicos, tal como se detalla en el apartado "5.4.1 Recubrimientos". Los cementos recomendados para cimentaciones especiales se encuentran recogidos en el apartado 2 del Capítulo 3.

6.5.1.3 Acción de la helada y sales fundentes

Cuando la absorción de agua por los áridos sea superior al 1%, para garantizar la resistencia del árido a la helada (ambientes H y F) la Instrucción EHE¹, en su artículo 28.6, establece que la pérdida de peso máxima experimentada por los áridos, al ser sometidos a cinco ciclos de tratamiento con soluciones de sulfato magnésico (método de ensayo UNE EN 1367-2), no debe ser superior al 18% en el árido grueso, ni al 15% para el árido fino.



CEDEX

Además, siempre es aconsejable utilizar áridos compactos, limpios y con una buena rugosidad superficial. Por el contrario, es desaconsejable el empleo de áridos de tamaño máximo grande o con gran proporción de lascas. Si el árido es de baja absorción y no está saturado antes de introducirlo en la mezcla, una vez en el hormigón apenas adquirirá agua y no romperá por la helada⁶.

El empleo de adiciones en este ambiente no redundará en un efecto tan beneficioso como en otros ambientes químicamente agresivos ya mencionados. Es por ello que el coeficiente de eficacia normal, de valor 2, que se asigna al humo de sílice se reduce a 1 en hormigones situados en este ambiente (apartado 5.2). En este mismo sentido, la Tabla 9, extraída de la Instrucción EHE exige mayores recubrimientos en estructuras de hormigón armado en las que se hayan utilizado cementos con adición de escoria o de humo de sílice. En esta Tabla el valor del recubrimiento sólo es de aplicación en cimentaciones especiales, a efectos del cálculo del ancho de fisura (ver "5.5 Anchura de fisura"), ya que los recubrimientos que deben utilizarse para este tipo de obras son específicos, tal como se detalla en el apartado "5.4.1 Recubrimientos". Los cementos recomendados para cimentaciones especiales se encuentran recogidos en el apartado 2 del Capítulo 3.

Tabla 9: Recubrimientos mínimos (mm) para las clases específicas de exposición H y F.

Ambiente	Tipo de cemento	Resistencia (N/mm ²)	Recubrimientos (mm)	
			Vida útil 50 años	Vida útil 100 años
H	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otros tipos de cemento	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	35
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
F	CEM II/A-D	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	35
	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	75
		$f_{ck} \geq 40$	20	40
	Otros tipos de cemento o empleando adiciones	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	40
		$f_{ck} \geq 40$	10	20

La utilización de adiciones en ambientes H y F, si bien permite reducir la permeabilidad del hormigón, dificultándose que se sature de agua, tiene una contribución menor que en el caso de ambientes químicamente agresivos, en los que se suma a la menor permeabilidad, la fijación de hidróxido cálcico atacable. Es por ello que la Instrucción, desde un punto de vista conservador, penaliza en ambiente de heladas el empleo de cementos con escorias de horno alto o con humo de sílice. Sin embargo, las recomendaciones del ACI específicas sobre estas adiciones indican que el comportamiento de estos cementos en ambientes de helada con y sin sales fundentes, es similar al de cementos pórtland normales, si se utilizan aireantes^{20,21,22}.

La introducción de aire ocluido (al menos un 4,5%) en el hormigón sólo es obligatoria por la Instrucción EHE cuando además de la existencia de los ciclos de hielo-deshielo, se utilicen sales fundentes (ambiente F)¹; sin embargo, también es recomendable su utilización para mejorar la resistencia del hormigón sometido únicamente a los efectos de los ciclos de hielo-deshielo. De hecho, cuando la construcción de los pilotes se realiza en clima frío y el terreno que circunda la

parte superior del pilote tiene que ser excavada después del hormigonado, es recomendable la utilización de aditivos oclusores de aire para la parte del pilote expuesta a la acción de las heladas.

En caso de utilizar aditivos oclusores de aire, el ACI recomienda utilizar un contenido de aire entre el 3% y el 7%, en función del tamaño máximo del árido y de la agresividad del ambiente. Si se utiliza demasiado aditivo, se reduce la resistencia del hormigón; si se utiliza poco aditivo, será menos efectivo de cara a resistir la acción de las heladas⁵.

6.5.1.4 Erosión

Para obtener un hormigón resistente a la erosión hay que adoptar las siguientes medidas¹:

- Resistencia mínima del hormigón de 30 N/mm².
- El árido fino debe ser cuarzo u otro material de, al menos, la misma dureza.
- El árido grueso debe tener un coeficiente de Los Ángeles inferior a 30.
- No se deben superar los contenidos de cemento que se indican a continuación para cada tamaño máximo del árido (D):

<u>D</u>	<u>Contenido máximo de cemento</u>
10 mm	400 kg/m ³
20 mm	375 kg/m ³
40 mm	350 kg/m ³

El tipo de cemento seleccionado para este ambiente no tiene influencia en el comportamiento del hormigón y así lo refleja la Tabla 10 extraída de la Instrucción EHE, en la que el recubrimiento depende únicamente de la categoría resistente del hormigón y de la vida útil fijada en el proyecto. En esta Tabla sólo es de aplicación para el caso de cimentaciones especiales el valor del recubrimiento únicamente a efectos del cálculo de ancho de fisura (ver "5.5 Anchura de fisura"). En proyecto y ejecución, los recubrimientos que deben utilizarse para este tipo de obras son específicos tal como se detalla en el apartado "5.4.1 Recubrimientos".

Tabla 10: Recubrimientos mínimos (mm) para la clase específica de exposición E.

Ambiente	Tipo de cemento	Resistencia (N/mm ²)	Recubrimientos (mm)	
			Vida útil 50 años	Vida útil 100 años
E	Cualquiera	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	80
		$f_{ck} \geq 40$	20	35



6.5.1.5 Reacción álcali-árido

La Instrucción EHE¹, en su artículo 28.7.6, establece que para comprobar la reactividad potencial de los áridos silíceos con los alcalinos del hormigón, se realizará, en primer lugar, un estudio petrográfico. Si de este estudio se deduce la posibilidad de que presente reactividad álcali-sílice o álcali-silicato, se debe realizar el ensayo descrito en la UNE 146508 EX.

Si a partir de los resultados de estos ensayos se deduce que el árido es potencialmente reactivo, éste no se puede utilizar en ambientes de elevada humedad (todas las clases generales menos I y IIb), salvo en el caso de obras especiales y obras en que no existan otros suministros viables, en las cuales puede emplearse el árido calificado a priori como potencialmente reactivo sólo si son satisfactorios los resultados del ensayo de reactividad potencial a largo plazo sobre prismas de hormigón, según UNE 146509 EX, presentando una expansión al finalizar el ensayo menor o igual al 0,04%.

Adicionalmente, en el caso de utilizar áridos susceptibles de producir reacciones álcali-árido, la Instrucción RC-08⁴ establece que se utilizarán cementos con un contenido de ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O}$) inferior al 0,60% en peso de cemento.

En caso de no ser posible cumplir las prescripciones comentadas a los materiales constituyentes (áridos no reactivos o empleo de cementos de bajo contenido de alcalinos), la Instrucción EHE¹ (artículo 37.3.7) recomienda realizar un estudio experimental específico sobre la conveniencia de adoptar una de las siguientes medidas:

- o Empleo de cementos con adiciones, salvo las de filler calizo, según la UNE 197-1 y la UNE 80307.
- o Empleo de adiciones al hormigón.
- o En estos casos puede estudiarse también la conveniencia de adoptar un método de protección adicional por impermeabilización superficial.

En este mismo sentido, la Instrucción RC-08⁴ indica que, para hormigones con áridos potencialmente reactivos, son muy adecuados los cementos comunes tipo CEM III, CEM IV, CEM V, CEM II/A-D, CEM II/B-S y CEM II/B-V, y adecuados los cementos comunes tipo CEM II/B-P y CEM II/B-M (entre ellos, deberían seleccionarse cementos específicos para cimentaciones especiales, tal como se indica en el apartado 2 del Capítulo 3).

En cualquier caso, la utilización de adiciones en el hormigón siempre es recomendable cuando se utiliza un árido sospechoso de ser reactivo. En cementos siderúrgicos debería utilizarse un contenido mínimo de 65% de escoria, en cementos puzolánicos un mínimo de 30% de cenizas volantes o puzolanas naturales. También es posible la combinación de cemento pórtland con un mínimo de 50% de escorias de alto horno o con un mínimo de 25% de cenizas volantes. En estos casos, las cenizas volantes tendrán un máximo del 1,5% de álcali disponible, un 6% de pérdida al fuego máxima (preferiblemente del 3%) y un máximo del 8% de CaO (preferiblemente del 2%), aunque se permiten contenidos de CaO entre el 8 y el 10% si el porcentaje de sustitución mínimo es del 30%. El humo de sílice debe entrar en una proporción del 5 al 7,5%, pero para que sea efectivo debe dispersarse bien en la mezcla y debe tener un bajo contenido en álcalis. De todos modos, la efectividad de las adiciones minerales para evitar la reacción expansiva debe ser comprobada mediante los ensayos específicos de reactividad potencial⁶.

6.5.2 Requisitos de dosificación

Para garantizar la adecuada impermeabilidad del hormigón, la Instrucción EHE¹ exige que el elemento de hormigón armado sea fabricado sin exceder un cierto valor de la relación a/c y con una dosificación de cemento superior a un valor mínimo estipulado, que son función de la clase de exposición a la que vaya a estar sometido dicho elemento (ver Tabla 6).

A título exclusivamente indicativo, la Instrucción EHE¹ indica además unas categorías resistentes mínimas (ver Tabla 7) que normalmente pueden alcanzarse con las especificaciones anteriores de máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento, y que pueden esperarse con carácter general cuando se emplean áridos de buena calidad. En cualquier caso, los requisitos de obligado cumplimiento afectan únicamente a la dosificación mencionada y no a los de resistencia. Se trata, por tanto, de una tabla meramente orientativa, al objeto de fomentar la deseable coherencia entre las especificaciones de durabilidad y las especificaciones de resistencia. En este sentido, se recuerda que en algunas zonas geográficas en las que los áridos sólo pueden cumplir estrictamente las especificaciones definidas para ellos en esta Instrucción, puede ser complicado obtener estos valores de resistencia, siendo, sin embargo, satisfechos los condicionantes de durabilidad. A este respecto, y para dosificaciones de hormigón en las que para su ajuste se llevan a cabo ensayos previos y característicos, la Instrucción EHE exige que en estos últimos la resistencia alcanzada satisfaga la resistencia de proyecto (f_{ck}) y no sea inferior en más de 5 N/mm² de la establecida en dicha Tabla para el ambiente que corresponda.



CEDEX

Tabla 6.- Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento para elementos de hormigón armado (en kg/m³).

Parámetros de dosificación	CLASE DE EXPOSICIÓN										
	I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	E
Máx. relación a/c	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,50
Mín contenido cemento	250	275	00	300	325	350	325	325	350	350	300

Tabla 7.- Resistencias características mínimas (en N/mm²) esperables de acuerdo con los requisitos de durabilidad para elementos de hormigón armado.

Resistencia mínima	CLASE DE EXPOSICIÓN									
	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F
	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30

Únicamente en el caso de la clase de exposición E (erosión) sí es obligatoria y no sólo indicativa una resistencia mínima del hormigón de 30 N/mm².

En el caso particular de que se utilicen adiciones en la fabricación del hormigón, cuando éstas se añaden directamente en el amasado, se puede tener en cuenta su empleo a los efectos del cálculo del contenido de cemento y de la relación agua/cemento, multiplicando su contenido por un factor que se denomina coeficiente de eficacia. A tales efectos, se debe sustituir para entrar en la Tabla 6 el contenido de cemento C (kg/m³) por C+KF, así como la relación A/C por A/(C+KF), siendo F (kg/m³) el contenido de adición y K el coeficiente de eficacia de la misma¹.

En el caso de las cenizas volantes, se debe tomar un valor de K no superior a 0,20 si se emplea un cemento CEM I 32,5, ni superior a 0,40 en el caso de cementos CEM I con otras categorías resistentes superiores. El Director de Obra puede admitir un valor de K superior al indicado, pero no mayor de 0,65, siempre que ello se deduzca como una estimación centrada en mediana del valor característico real, definido como el cuantil del 5% de la distribución de valores de K. La estimación referida debe proceder de un estudio experimental, que debe ser validado previamente por el correspondiente organismo certificador del hormigón y que no sólo tenga en cuenta la resistencia, sino también el comportamiento frente a la agresividad específica del ambiente al que va a estar sometida la estructura¹.

En el caso del humo de sílice¹, se debe tomar un valor de K no superior a 2, excepto en el caso de hormigones con relación agua/cemento mayor que 0,45 que vayan a estar sometidos a clases de exposición H o F, en cuyo caso para K se tomará un valor igual a 1.

Los requisitos de utilización de las adiciones minerales (contenido máximo de adición, tipo y mínimo contenido de cemento, requisito de la adición, etc.) han sido desarrollados en el apartado 6.2 del Capítulo 3.

En el ámbito internacional, destacan las recomendaciones del BRE²⁵, específicas para hormigón en terrenos agresivos. En cuanto a los aspectos de dosificación, cabe señalar que estas recomendaciones no exigen requisitos de dosificación a los hormigones de cimentaciones en terrenos sin agresividad. Si la agresividad es moderada, se contemplan hormigones con contenidos mínimos de cemento de 300 kg/m³ y relación agua/cemento máxima de 0,55, llegándose a valores de 400 y 0,40 respectivamente en terrenos de gran agresividad, por ejemplo con agua subterránea conteniendo más de 6000 mg/l de SO₄ y más de 1000 mg/l de Mg, o bien en terrenos con agua estática de pH inferior a 3,5 o agua en movimiento con pH inferior a 5,5.

6.5.3 Impermeabilidad del hormigón

El cumplimiento de los requisitos de dosificación se debe constatar experimentalmente comprobando la impermeabilidad al agua del hormigón con la dosificación adoptada, mediante el método de determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión, según la UNE-EN 12390-8. Este ensayo sólo es obligatorio para hormigones en los ambientes III, IV o cualquier clase específica de exposición, por lo que el hormigón de pantallas y pilotes situado en los citados ambientes debería cumplir que¹:



CEDEX

Clase de exposición	Profundidad máxima	Profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, Qb, E, H, F	50 mm	30 mm
IIIc, Qc	30 mm	20 mm

Los requisitos de impermeabilidad al agua tan exigentes establecidos para los ambientes IIIc y Qc son difícilmente alcanzables con hormigones fabricados con cemento pórtland normal, por lo que es recomendable la utilización de adiciones que contribuyan a mejorar dicha impermeabilidad. Si además éstas se añaden directamente al hormigón, pueden contabilizarse a efectos de contenido de cemento y relación agua/cemento, de acuerdo con sus coeficientes de eficacia.

En los ambientes I, IIa y IIb, al ser considerados menos agresivos, la Instrucción EHE no exige comprobar la impermeabilidad del hormigón mediante el ensayo de penetración de agua bajo presión.

6.5.4 Recubrimiento de las armaduras

6.5.4.1 Requisitos de los recubrimientos

En el caso general de construcción de estructuras hormigonadas contra el terreno, la Instrucción EHE especifica que el recubrimiento mínimo debe ser de 70 mm. Para conseguir este recubrimiento mínimo la técnica constructiva utilizada en el caso de pantallas y pilotes, suele llevar a recubrimientos incluso algo mayores en algunas zonas de la cimentación. Adicionalmente al requisito del recubrimiento mínimo exigido, la Instrucción EHE establece:

- La necesidad de considerar, por construcción, un margen de recubrimiento (que debe sumarse al mínimo establecido anteriormente, para obtener el recubrimiento nominal a prescribir en el proyecto) función del nivel de control de ejecución, de 5 mm para el caso de nivel intenso de control de ejecución, y 10 mm, en los demás casos.
- La exigencia de disponer separadores y calzos para garantizar el recubrimiento

En la normativa específica para pilotes se observan algunas diferencias con el recubrimiento exigido por la Instrucción EHE. Así, la norma EN 1536⁸ establece unos recubrimientos mínimos en función del diámetro del pilote, de forma que dicho recubrimiento mínimo es de 60 mm para pilotes de diámetro mayor que 0,60 m, y de 50 mm para pilotes de diámetro menor o igual que 0,60 m.

En cualquier caso, también se indica que este recubrimiento mínimo en pilotes se debe incrementar a 75 mm cuando¹⁷:

- El pilote se ejecute en terreno blando y se construya sin entubar.
- Las condiciones ambientales sean de clase H o F según se definen en la Instrucción EHE-08.
- Se coloque el hormigón en condiciones sumergidas, con un tamaño máximo de árido de hasta 25 mm (32 mm según la norma EN 1536⁸).

- La armadura se instale después de la colocación del hormigón.
- La perforación tenga las superficies irregulares.
- El pilote no sea de sección circular⁸.

El ACI en cambio establece un recubrimiento mínimo de 75 mm cuando el pilote vaya a estar en contacto con el terreno y de 100 mm en caso de utilizar entubados recuperables²³, o incluso mayores cuando la jaula de armadura o el entubado son de gran longitud, para evitar que se junten durante la extracción del entubado²⁴.

En pantallas, la norma EN 1538¹⁸ establece que el recubrimiento de proyecto debe ser al menos de 75 mm.

Por tanto, el valor nominal de recubrimiento exigido por la Instrucción EHE de 75 a 80 mm en elementos hormigonados contra el terreno resulta igual o más conservador al recogido de las normativas europeas, siendo aquél de obligado cumplimiento.

En el caso de cimentaciones que no se hormigonen directamente contra el terreno (por ejemplo, si se utiliza un encamisado o forro permanente), la Instrucción EHE no señala nada expresamente, por lo que puede acudir a la normativa específica de cimentaciones especiales^{8,17}, que permite reducir a 40 mm el recubrimiento de hormigón en estos casos. Otras recomendaciones específicas como las del ACI²⁴, por el contrario, exigen también en este caso un recubrimiento mínimo de 75 mm o de tres veces (preferiblemente cinco veces) el tamaño máximo del árido grueso, cualquiera que sea el mayor de los dos.

6.5.4.2 Separadores

Los recubrimientos deben garantizarse mediante la disposición de los correspondientes elementos separadores colocados en obra. Estos separadores deben estar constituidos por materiales resistentes a la alcalinidad del hormigón, y no inducir corrosión de las armaduras. Deben ser al menos tan impermeables al agua como el hormigón y ser resistentes a los ataques químicos a que se pueda ver sometido éste. Deben ser de hormigón, mortero, plástico rígido o material similar y haber sido específicamente diseñados para este fin; por el contrario, no se permite emplear madera o cualquier material residual de la construcción, y si pueden quedar vistos, tampoco pueden emplearse materiales metálicos¹.

Si los separadores son de hormigón, éste debe ser de calidad comparable a la del utilizado en la construcción de la pieza, en cuanto a resistencia, permeabilidad, higroscopicidad, dilatación térmica, etc.; si son de mortero, su calidad debe ser semejante a la del mortero contenido en el hormigón de la obra. Si se utilizan separadores constituidos con material que no contenga cemento, para asegurar su buen enlace con el hormigón de la pieza deben presentar orificios cuya sección total sea al menos equivalente al 25% de la superficie total del separador¹.

En los pilotes se debe mantener mediante separadores la posición concéntrica de la jaula de armadura dentro de la perforación y el necesario recubrimiento de hormigón, a menos que se aseguren de otra manera. Estos elementos se deben diseñar y fabricar usando materiales duraderos que no produzcan corrosión de la armadura ni pérdida del recubrimiento de hormigón. Está permitido el uso de tacos metálicos como separadores⁸.

Los separadores se deben colocar simétricamente en torno a la jaula, con al menos 3 unidades en cada nivel; en intervalos de niveles no superiores a 3 m; y con tolerancia suficiente con



respecto a la pared interna del entubado o las paredes de la excavación, de forma que puedan colocarse con seguridad y no se perjudiquen las paredes de la excavación. El número de separadores debe incrementarse en pilotes de diámetro mayor o igual que 1,2 m y en pilotes inclinados⁸.

En el caso de pilotes sin entubación, se deben utilizar separadores de gran tamaño y con la forma adecuada, de modo que no se produzca el colapso de las paredes durante la instalación de la armadura⁸.

En pilotes con sección no circular, se suelen colocar al menos dos separadores por nivel en cada lado mayor de la jaula⁸.

Asimismo, en pantallas se deben colocar separadores para asegurar que el recubrimiento mínimo exigido se respeta. Estos elementos pueden estar constituidos bien por tubos verticales, bien por dispositivos puntuales, cuyo tamaño debe adaptarse a las características del suelo. Para las obras permanentes, los separadores deben ser de un material diferente del acero y deben presentar un nivel de supervivencia al menos igual al del hormigón, salvo que los mismos se retiren durante el hormigonado^{2, 8}. Para jaulas muy pesadas pueden utilizarse separadores de acero recubiertos de plástico⁸.

En pantallas, lo habitual es colocar al menos dos separadores por nivel en cada lado mayor de la jaula, con una separación vertical de 3 a 5 metros, en función de la rigidez de la jaula¹⁸.

6.5.5 Abertura de fisura

La Instrucción EHE¹, en su artículo 5.1.1.2, establece una abertura máxima de fisura (bajo la combinación de acciones cuasipermanentes para elementos de hormigón armado) en función del ambiente en que se encuentre la estructura, de acuerdo con la Tabla 12.

Tabla 12.- Abertura máxima de fisura.

Clase de exposición	Abertura de fisura (mm)
I	0,4
Ila, I Ib, H	0,3
IIla, II Ib, IV, F, Qa	0,2
II Ic, Qb, Qc	0,1

En el caso de las clases de exposición Q, la limitación del ancho de fisura sólo será aplicable cuando el grado de agresividad pueda afectar a la corrosión de las armaduras.

Para el caso de piezas hormigonadas contra el terreno, en las que se establece como norma general un recubrimiento de 70 mm, la Instrucción EHE¹ en cambio permite adoptar para el cálculo del ancho de fisura, el recubrimiento nominal correspondiente a la clase de exposición recogido en las Tablas 5, 6, 8, 9 y 10.

Otras normas internacionales aceptan aberturas máximas de fisura algo mayores, pero a cambio suelen ser más estrictas en otros aspectos, como la dosificación del hormigón. Así, considerando por ejemplo las normas específicas para estructuras en ambiente marino, la norma británica BS6349²⁶ permite una abertura máxima de fisura de 0,3 mm en ambientes IIIa y IIIb (en la Instrucción EHE es de solo 0,2 mm) y menor que este valor en ambiente IIIc (sin especificar; en la Instrucción EHE es de 0,1 mm). Sin embargo, la norma británica exige a la vez mayores contenidos de cemento (hasta 400 kg/m³ en ambiente IIIc) que la Instrucción española, mayores recubrimientos y mayores tiempos de curado. La norma japonesa²⁷ establece una abertura máxima de fisura en función del recubrimiento e igual a $0,0035 \cdot c$ (en cm), que también supone valores algo superiores a los de la Instrucción EHE para el ambiente IIIc, pero en cambio exige mayores recubrimientos y menores contenidos iniciales de cloruros.

En todo caso, hay que recordar que las dosificaciones exigidas al hormigón para presentar una buena durabilidad en ambientes agresivos suponen utilizar cantidades elevadas de cemento, por lo que hay que prestar especial cuidado para evitar la formación de fisuras en la superficie del hormigón debido al elevado calor de hidratación generado²⁸.

6.5.6 Medidas especiales de protección

El diseño de la mezcla por sí solo, puede no resultar protección suficiente en caso de condiciones particularmente severas de aguas subterráneas o de terrenos. Como protección adicional del hormigón de los pilotes contra la agresividad del suelo y/o de los acuíferos se pueden utilizar, por ejemplo, camisas perdidas^{3,8}. También se pueden utilizar camisas perdidas para proteger el hormigón fresco contra la lixiviación producida por corrientes subterráneas de agua⁸.

En casos de especial agresividad, cuando las medidas normales de protección no se consideren suficientes, se puede recurrir a la disposición de sistemas especiales de protección de las armaduras, como por ejemplo¹:

- Aplicación de revestimientos superficiales con productos específicos para la protección del hormigón (pinturas y revestimientos), conformes con las normas de la serie UNE-EN 1504 que les sean de aplicación.
- Protección de las armaduras mediante revestimientos (por ejemplo, armaduras galvanizadas).
- Protección catódica de las armaduras, mediante ánodos de sacrificio o por corriente impresa, según UNE-EN 12696.
- Armaduras de acero inoxidable, según UNE 36067.
- Aditivos inhibidores de la corrosión.

Igualmente, en caso de que el hormigón vaya a estar en contacto con agua muy ácida (pH por debajo de 3), habrá que usar algún tipo de protección del hormigón (impermeabilización,...), ya que ningún hormigón puede resistir a largo plazo esa acidez¹⁵.

Las recomendaciones del BRE indican varias posibilidades de medidas especiales de protección para el hormigón en contacto con terrenos agresivos, de las que se resumen a continuación aquellas de aplicación para cimentaciones especiales²⁵:

Utilización de protección superficial en el hormigón mediante recubrimientos o barreras impermeables. Esta medida puede ser de utilidad para la cara vista de pantallas. Los



productos que se utilicen deben ser resistentes al ambiente químico en el que se vayan a encontrar, no deben afectar al hormigón que recubren, deben ser resistentes al daño mecánico, fáciles de aplicar y durables. Como recubrimientos se utilizan emulsiones bituminosas y resinas epoxi. Como barreras impermeables se utilizan membranas plásticas y bituminosas.

Utilización de un recubrimiento de sacrificio: Se puede aumentar el espesor del recubrimiento con la finalidad de disponer de una capa de sacrificio. Este espesor añadido siempre debe considerarse adicional al nominal exigido en el ambiente, incluso a los 75 mm en el hormigonado directo contra el terreno. Tampoco debe ser considerado a efectos de cálculo de anchura de fisura. Un espesor extra de unos 50 mm puede aportar una vida útil adicional entre 30 y 120 años, en función de la agresividad. Esta medida no es adecuada en elementos que resistan por fricción, por ejemplo en pilotes, pero sí podría aplicarse al caso de pantallas, o pantallas de pilotes. En cualquier caso, debe tenerse en cuenta si el ataque que se ocasione a esta capa puede afectar la integridad estructural, por ejemplo al introducir fuerzas expansivas o al reducir las fuerzas de fricción que ocasionen asentamientos.

Emplazamiento de drenajes: La medida consiste en establecer sistemas de drenaje para minimizar el contacto entre el agua subterránea y el hormigón. Los drenes deben inspeccionarse y mantenerse periódicamente.

Terrenos impermeables: En ocasiones puede aprovecharse también la propia impermeabilidad del terreno (estratos arcillosos), para proteger el hormigón de corrientes de agua agresivas.

Utilización de un hormigón de muy buena calidad: En ambientes de especial agresividad, puede ser conveniente utilizar dosificaciones más estrictas a las requeridas por la Instrucción para los ambientes agresivos contemplados en ella. En este sentido, las recomendaciones del BRE incluyen dosificaciones de cemento mínimas de 400 kg/m³ y relaciones agua/cemento máximas de 0,40 en algunos terrenos de gran agresividad.

Utilización de camisas perdidas, en cuyo caso^{8,17}, se puede reducir a 40 mm el recubrimiento de hormigón en cualquiera de los casos.

6.6 Bibliografía

- 1.- MINISTERIO DE FOMENTO (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 2.- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (2002). Pantallas continuas de hormigón armado moldeadas "in situ". En *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*.
- 3.- Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C. Seguridad estructural. Cimientos (2006).
- 4.- MINISTERIO DE FOMENTO (2008). *Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 5.- ACI (2006). Design, manufacture and installation of concrete piles. ACI 543R. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 6*. Detroit: Ed. American Concrete Institute.

- 6.- ALAEJOS, M. P. y BERMÚDEZ, M. A. (2003). *Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas. Estudio Bibliográfico*. Monografía M-76. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid.
- 7.- BERMÚDEZ, M. A. (2008). *Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida*. Tesis Doctoral. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.
- 8.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Bored piles. PRE-NORMA prEN 1536:2008*.
- 9.- MEHTA, P. K. y MONTEIRO, P. J. M. (1986). *Concrete. Structure, Properties and Materials* (113-178). Ed. Prentice Hall.
- 10.- BRE CENTRE FOR CONCRETE CONSTRUCTION. (2000). *Corrosion of steel in concrete. Digest 444 (parts 1 to 3)*. Londres: CRC.
- 11.- SONG, G. y SHAYAN, A. (1998). *Corrosion of steel in concrete: causes, detection and prediction. State-of-the-art review*. ARRB Transport Research Ltd., Review Report 4.
- 12.- RILEM. *Corrosion of steel in concrete. Report of the Technical Committee 60-CSC*. : P. Schiessl.
- 13.- GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGÓN (1996). *Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de diseño CEB, boletín GEHO nº 12*. Madrid: Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- 14.- NEVILLE, A. M. (1981) *Properties of concrete*.- Longman Scientific & Technical (Págs. 433 a 528).
- 15.- ACI (2003) Guide to Durable Concrete. ACI 201.2R-92. En *ACI Manual of Concrete Practice Part 1: Materials and General Properties of Concrete*. Detroit: Ed. American Concrete Institute
- 16.- AGUADO, A. et al. (1996) *Diagnóstico de daños y reparación de obras hidráulicas de hormigón*. (Monografías 19). Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- 17.- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (2002). Cimentaciones por pilotes de hormigón armado moldeados "in situ". En *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*.
- 18.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Diaphragm walls. PRE-NORMA prEN 1538:2008*.
- 19.- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1989). *Hormigón* (364-400). Madrid: E.T.S. Ingenieros de Caminos.
- 20.- ACI (2007) Guide for the use of silica fume in concrete. ACI 234R-06. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 2*. Detroit: Ed. American Concrete Institute
- 21.- ACI (2007) Use of fly ash in concrete. ACI 232.2R-03. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 2*. Detroit: Ed. American Concrete Institute
- 22.- ACI (2007) Slag cement in concrete and mortar. ACI 233R-03. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 2*. Detroit: Ed. American Concrete Institute
- 23.- ACI (2006). Specification for the construction of drilled piers. ACI 336.1. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 3*. Detroit: Ed. American Concrete Institute.



CEDEX

- 24.- ACI (2006). Drilled piers. ACI 336.3R. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 3*. Detroit: Ed. American Concrete Institute.
- 25.- BRE (2001). Special Digest "Concrete in aggressive ground".
- 26.- BRITISH STANDARD CODE OF PRACTICE FOR MARITIME STRUCTURES. BS 6349. British Standards Institution.
- 27.- TECHNICAL STANDARDS FOR PORT AND HARBOUR FACILITIES IN JAPAN. Bureau Of Ports and Harbours. Ministry of Transports. Tokio, 2002.
- 28.- RODRÍGUEZ ORTIZ, J.M. (2007) *Algunos temas de interés en el diseño de muros pantalla*. Muros pantalla en el ámbito urbano. Jornada Técnica de AETESS. Barcelona.

7. CONTROL DE CALIDAD

7.1 Introducción

El objetivo del control de calidad es asegurar que la cimentación se construye de acuerdo con las especificaciones de diseño y dentro de unas tolerancias aceptables. Esto supone comprobar la ubicación y dimensiones de la cimentación, el proceso de ejecución y los materiales constituyentes.

Para el caso particular de las operaciones relacionadas con el suministro y colocación del hormigón, objeto principal de la presente publicación, las comprobaciones que se realizan en el control de calidad pretenden garantizar que el material cumple con las especificaciones de diseño y que su puesta en obra no produce defectos en la cimentación, tales como los que se señalan a continuación:

- a) Suministro de hormigón de calidad deficiente en el punto de hormigonado.
- b) Falta de compacidad en la cimentación por el empleo de un hormigón con un asiento en el cono de Abrams inferior al valor exigido.
- c) Segregación del hormigón debido a una puesta en obra defectuosa.
- d) Mezcla del hormigón con el lodo de perforación ocasionada por un ritmo de vertido excesivamente lento.
- e) Contaminación del hormigón y posible corte del elemento estructural durante el hormigonado por derrumbamiento lateral del terreno o por decantación del exceso de arena contenido en el lodo de perforación (figura 1a).
- f) Lavado del hormigón por corrientes subterráneas de agua o por sifonamiento en zonas con altas presiones intersticiales (figura 1b).
- g) Migración del agua de amasado del hormigón hacia la zona superficial, donde se acumula, lo que supone un aumento en la relación agua/cemento en esa zona y en consecuencia una reducción de la calidad del material.
- h) Incapacidad de rellenar el volumen completo de la cimentación por un exceso de armadura.
- i) Contaminación de las juntas de pantalla por la utilización de lodos de perforación con propiedades deficientes.
- j) Contaminación del hormigón en pilotes con entubado recuperable, por extracción prematura de la camisa.

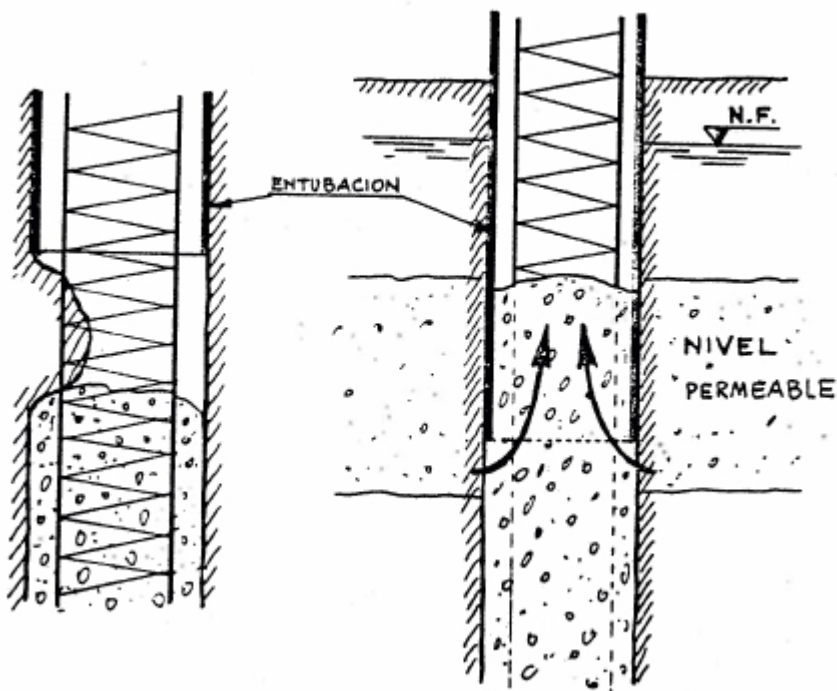

Figura 1a. Corte del pilote⁹

Figura 1b. Sifonamiento del hormigón⁹

7.2 Aspectos generales

El proyecto de ejecución de cualquier estructura de hormigón deberá incluir en su memoria un anejo con un plan de control que identifique cualquier comprobación que pudiera derivarse del mismo.

Antes de iniciar las actividades de control en la obra, la Dirección Facultativa aprobará un programa de control, preparado de acuerdo con el plan de control definido en el proyecto, y considerando el plan de obra del Constructor. El programa de control contemplará, al menos, los siguientes aspectos:

- la identificación de productos y procesos objeto de control, definiendo los correspondientes lotes de control y unidades de inspección, describiendo para cada caso las comprobaciones a realizar y los criterios a seguir en el caso de no conformidad;
- la previsión de medios materiales y humanos destinados al control con identificación, en su caso, de las actividades a subcontratar;
- la programación del control, en función del procedimiento de autocontrol del Constructor y el plan de obra previsto para la ejecución por el mismo;
- la designación de la persona encargada de las tomas de muestras, en su caso; y
- el sistema de documentación del control que se empleará durante la obra.

La Dirección Facultativa, en representación de la Propiedad, debe efectuar las comprobaciones de control suficientes que le permitan asumir la conformidad de la cimentación en relación con los requisitos básicos para los que ha sido concebida y proyectada. Durante la ejecución de las obras, la Dirección Facultativa debe realizar los controles siguientes¹:

- control de recepción en obra de los productos que se suministren a la misma.
- control de la ejecución de la cimentación.
- control de la cimentación terminada.

La Instrucción EHE¹ contempla una serie de comprobaciones que permiten desarrollar los controles anteriores; no obstante, la Dirección Facultativa puede optar, bajo su responsabilidad, por otras alternativas de control siempre que demuestre que son equivalentes y no suponen una disminución de las garantías para el usuario.

La Dirección Facultativa, en representación de la Propiedad, podrá encomendar la realización de los ensayos de control a un laboratorio, público o privado acreditado, así como otras actividades de asistencia técnica a entidades de control de calidad. El laboratorio deberá entregar antes del inicio de la obra, una declaración firmada por persona física, que avale su independencia (ausencia de relaciones empresariales) respecto al resto de los agentes involucrados en la obra¹.

En todas las actividades ligadas al control de recepción, podrá estar presente un representante del agente responsable de la actividad o producto controlado (Suministrador de hormigón, Suministrador de las armaduras elaboradas, Constructor, etc.), que deberá firmar, si está presente, el parte o registro correspondiente. Cuando se produzca una no conformidad, podrá solicitar una copia del correspondiente informe del laboratorio de control¹.

7.3 Control de los materiales constituyentes del hormigón

7.3.1 Aspectos generales

En el ámbito de la Instrucción EHE¹, sólo pueden utilizarse productos de construcción legalmente comercializados en países que sean miembros de la Unión Europea o bien que sean parte del Acuerdo sobre el Espacio Económico Europeo. En determinados casos, y con el fin de asegurar su idoneidad, la Instrucción establece las características técnicas de los materiales, productos, equipos y sistemas incluidos en su ámbito, sin perjuicio del Mercado CE que les sea aplicable de acuerdo con las correspondientes Directivas Europeas y, en particular, con la Directiva 89/106/CEE.

Por otra parte, de forma voluntaria, los productos y los procesos pueden ostentar distintivos de calidad que avalen, mediante las correspondientes auditorías, inspecciones y ensayos, que sus sistemas de calidad y sus controles de producción, cumplen las exigencias requeridas para la concesión de tales distintivos. La Instrucción EHE permite aplicar unas consideraciones especiales cuando ostenten un distintivo de calidad de carácter voluntario que esté oficialmente reconocido por un Centro Directivo con competencias en el ámbito de la edificación o de la obra pública y perteneciente a la Administración Pública de un Estado miembro del Espacio Económico Europeo¹.

El control de recepción de los productos tiene por objeto comprobar que sus características técnicas cumplen lo exigido en el proyecto. En el caso de productos con marcado CE según la Directiva 89/106/CEE, puede comprobarse su conformidad mediante la verificación de que los valores declarados en los documentos que acompañan al citado marcado CE permiten deducir el



cumplimiento de las especificaciones indicadas en el proyecto y, en su defecto, en la Instrucción EHE¹.

En otros casos, el control de recepción de los productos debe comprender¹:

- a) el control de la documentación de los suministros que llegan a la obra.
- b) en su caso, el control mediante distintivos de calidad o procedimientos que garanticen un nivel de garantía adicional equivalente.
- c) en su caso, el control mediante ensayos.

En cuanto al control mediante ensayos, la Dirección Facultativa, en uso de sus atribuciones, puede disponer en cualquier momento la realización de comprobaciones o ensayos adicionales sobre las remesas o las partidas de productos suministrados a la obra o sobre los empleados para la elaboración de los mismos, lo cual es de aplicación directa a los materiales componentes y al propio hormigón. En ese caso, los laboratorios de control (públicos o privados acreditados) deben facilitar sus resultados acompañados de la incertidumbre de medida para un determinado nivel de confianza, así como la información relativa a las fechas, tanto de la entrada de la muestra en el laboratorio como la de realización de los ensayos¹.

Dentro del control documental referido en los apartados a) y b) anteriores, los Suministradores deben entregar al Constructor, quien debe facilitarlos a la Dirección Facultativa, cualquier documento de identificación del producto exigido por la reglamentación aplicable o, en su caso, por el proyecto o por la Dirección Facultativa. Sin perjuicio de lo establecido adicionalmente para cada producto, se deben facilitar, al menos, los siguientes documentos¹:

a) antes del suministro:

- los documentos de conformidad o autorizaciones administrativas exigidas reglamentariamente, incluida cuando proceda la documentación correspondiente al marcado CE de los productos de construcción, de acuerdo el Real Decreto 1630/1992, de 29 de diciembre, por la que se dictan disposiciones para la libre circulación de los productos de construcción, en aplicación de la Directiva 89/106/CEE,
- en su caso, una copia compulsada por persona física de los certificados que avalen que los productos suministrados están en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido junto con declaración del Suministrador firmada por persona física en la que conste la vigencia en la fecha del distintivo. Antes del suministro, la Dirección Facultativa debe valorar si la documentación aportada es suficiente para la aceptación del producto suministrado o, en su caso, qué comprobaciones deben efectuarse.

b) durante el suministro:

- las hojas de suministro de cada partida o remesa.

c) después del suministro:

- el certificado de garantía del producto suministrado, firmado por persona física con poder de representación suficiente.

7.3.2 Control de los componentes

El control de la conformidad de los materiales componentes del hormigón debe ser efectuado por el responsable de la recepción en la central de hormigón, ya sea de hormigón preparado o de

obra (en este último caso el responsable es el Constructor), salvo en el caso de áridos de autoconsumo en centrales de obra, que se debe llevar a cabo por la Dirección Facultativa¹.

Los cementos habitualmente utilizados en cimentaciones especiales se encuentran dentro de los Cementos Comunes o bien se trata de cementos resistentes a sulfatos o agua de mar, ambos recogidos por la Instrucción de cementos RC-08 (ver 2.1). En el caso de los cementos comunes, éstos deben poseer el marcado CE, lo cual garantiza su conformidad con los requisitos de la norma europea EN 197-1:2000. El control de estos cementos se debe llevar a cabo mediante la verificación de que la documentación del marcado CE indica que el cemento corresponde al tipo y a la clase de resistencia del cemento especificado en el proyecto. Los cementos resistentes a sulfatos y agua de mar no disponen de norma armonizada, y por tanto no poseen marcado CE, por lo que la verificación documental debe comprobar que disponen de un Certificado de Conformidad con la Instrucción de Cementos RC-08, tal como desarrolla el RD 1313/1988. Si el cemento ostenta un distintivo de calidad, también se comprobará la documentación en la que conste el reconocimiento oficial y vigente por la Autoridad competente de dicho distintivo, tal como se detalla en el apartado 3.1.

El Marcado CE es obligatorio para los áridos (salvo los de autoconsumo, es decir, aquellos áridos utilizados exclusivamente para la central de hormigonado suministradora, y que, por lo tanto, no son objeto de explotación comercial). El Marcado implica su conformidad con los requisitos de la norma europea EN 12620:2003. El control de estos áridos de acuerdo con la Instrucción EHE se debe llevar a cabo mediante la verificación documental de que los valores declarados en los documentos que acompañan al citado marcado CE cumplen las especificaciones contempladas en el proyecto y en el artículo 28º de la Instrucción EHE¹ (ver Capítulo 3, apartado 4).

En el caso de áridos de autoconsumo que no disponen de marcado CE, el Constructor (para centrales de obra) o, en su caso, el Suministrador del hormigón (para centrales de hormigón preparado), debe aportar un certificado de ensayo, con antigüedad inferior a tres meses, realizado por un laboratorio de control que demuestre la conformidad del árido respecto a las especificaciones contempladas en el proyecto y en el artículo 28º de la Instrucción EHE¹, con un nivel de garantía estadística equivalente al exigido para los áridos con marcado CE en la norma UNE EN 12620:2003.

El Marcado CE de las adiciones es obligatorio para cenizas volantes y humo de sílice, e implica su conformidad con los requisitos de la norma europea EN 450:1995 (cenizas volantes) o la norma europea EN 13263:2006 (humo de sílice)¹⁰. El control de estas adiciones de acuerdo con la Instrucción EHE se debe llevar a cabo mediante la verificación documental de que los valores declarados en los documentos que acompañan al marcado CE cumplen las especificaciones contempladas en el proyecto y en el artículo 30º de la Instrucción EHE (ver Capítulo 3, apartado 6). A diferencia del humo de sílice, en el caso de empleo de cenizas volantes como adición al hormigón, es imprescindible comprobar previamente que el hormigón que se va a suministrar, está en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido¹.

El Marcado CE de los aditivos implica su conformidad con los requisitos de la norma europea EN 934-2. Para el caso de los aditivos habituales en hormigón para cimentaciones especiales, están contemplados por esta norma y por tanto deben poseer el Marcado CE los aditivos plastificantes, superplastificantes y retardadores de fraguado. También deben poseer el Marcado CE los aceleradores de fraguado y aireantes, aunque estos aditivos no son de uso habitual en este tipo de obras. El control en estos casos, de acuerdo con la Instrucción EHE se debe llevar a cabo mediante la verificación documental de que los valores declarados en los documentos que



acompañan al citado marcado CE cumplen las especificaciones contempladas en el proyecto y en el artículo 29º de la Instrucción EHE¹ (ver Capítulo 3, apartado 5).

En el caso de aditivos que, por no estar incluidos en las normas armonizadas, no dispongan de marcado CE, el Constructor o, en su caso, el Suministrador de hormigón o de los elementos prefabricados, debe¹ aportar un certificado de ensayo, con antigüedad inferior a seis meses, realizado por un laboratorio de control que demuestre la conformidad del aditivo a las especificaciones contempladas en el proyecto y en el artículo 29º de la Instrucción EHE, con un nivel de garantía estadística equivalente que el exigido para los aditivos con marcado CE en la norma UNE EN 934-2:2002.

En cuanto al agua empleada, se puede eximir de la realización de los ensayos cuando se utilice agua potable de red de suministro. En otros casos, la Dirección Facultativa, o el Responsable de la recepción en el caso de centrales de hormigón preparado, debe realizar los ensayos que garanticen el cumplimiento de las especificaciones recogidas en el artículo 27 de la Instrucción EHE (ver Capítulo 3, apartado 3) con una periodicidad semestral¹.

7.4 Control del hormigón

7.4.1 Distintivos de calidad

De forma voluntaria, el hormigón suministrado a obra puede tener un nivel de calidad superior al mínimo requerido por la Instrucción EHE, disponiendo de un distintivo de calidad. La Instrucción EHE contempla la aplicación de ciertas consideraciones especiales en el control del hormigón que presente un distintivo de calidad oficialmente reconocido por un Centro Directivo con competencias en el ámbito de la edificación o de la obra pública y perteneciente a la Administración Pública de cualquier Estado miembro de la Unión Europea o de cualquiera de los Estados firmantes del Acuerdo sobre el Espacio Económico Europeo¹.

Los requisitos adicionales que cumple el hormigón con distintivo de calidad de acuerdo con el Anejo nº19 de la Instrucción EHE en su apartado 5.1 son, entre otros:

- Trazabilidad de los materiales componentes del hormigón dentro de las amasadas fabricadas, y de estas mismas en su envío a las diferentes obras.
- Sistemas electrónicos para garantizar la dosificación.
- Utilización de amasadoras fijas o móviles con sistemas de lacrado.
- Camiones de transporte lacrados.
- Autocontrol con determinación diaria de la resistencia, y control externo con dos determinaciones al mes.
- Homogeneidad en la producción, existiendo límites en la Instrucción a la dispersión máxima admisible, función del nivel de resistencia del hormigón.
- Cada tipo de hormigón fabricado por la Central es un producto diferente que debe cumplir los requisitos de manera independiente para ostentar el distintivo de calidad.

Para la obtención del distintivo debe disponerse de un histórico de resultados al menos de seis meses. Para centrales de obra, sin embargo, este período podrá ser de dos meses. Adicionalmente, la central debe disponer de un sistema de gestión de calidad UNE EN ISO 9001 y una póliza de seguro por responsabilidad civil de cuantía suficiente¹.

El hormigón puede poseer un distintivo de calidad transitorio (su validez expira el año 2010), regulado por el apartado 6 del citado Anejo y que tiene un nivel de exigencia inferior al

anteriormente citado: no se exige el lacrado de camiones, la dispersión en la producción del hormigón admisible es superior, el autocontrol tiene verificación semanal, etc.

Finalmente, la Instrucción EHE contempla asimismo, en el caso de productos fabricados o de procesos ejecutados en la propia obra, la posibilidad de admitir un sistema equivalente a los distintivos de calidad antes referidos, que esté validado y supervisado bajo la responsabilidad de la Dirección Facultativa.

Los distintivos de calidad que hayan sido objeto de reconocimiento o, en su caso, renovación o anulación, podrán inscribirse en el registro específico que se crea en la Secretaría General Técnica del Ministerio de Fomento (Subdirección General de Normativa, Estudios Técnicos y Análisis Económico) que resolverá la inclusión, en su caso, en la página WEB de la Comisión Permanente del Hormigón (www.fomento.es/cph), para su difusión y general conocimiento¹.

7.4.2 Comprobaciones documentales y experimentales antes del comienzo del hormigonado

En cuanto a las comprobaciones documentales antes del comienzo del hormigonado, para hormigones en posesión de un distintivo de calidad el suministrador debe presentar una copia compulsada por persona física de los certificados que así lo avalen junto con declaración del Suministrador firmada por persona física en la que conste la vigencia en la fecha del distintivo¹.

En el caso de hormigones que no estén en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido, el Suministrador, o en su caso el Constructor, debe presentar a la Dirección Facultativa¹:

- Copia compulsada por persona física con representación suficiente del certificado de dosificación, cuyo contenido será acorde con lo indicado en el Anejo 22 de la Instrucción EHE conteniendo, entre otros aspectos: identificación de la central, identificación de materias primas, designación tipificada del hormigón y su composición. En el caso de hormigones utilizados en ambientes diferentes al I, IIa y IIb el certificado debe contener los resultados de los ensayos característicos de dosificación realizados por laboratorio acreditado y con antigüedad no superior a seis meses.
- En su caso, resultados del resto de los ensayos previos y característicos, realizados por laboratorio acreditado y con antigüedad no superior a seis meses.

Las comprobaciones experimentales previas al suministro de hormigón consistirán, en su caso, en la realización de ensayos previos y de ensayos característicos. No son necesarios los ensayos previos, ni los característicos de resistencia, en el caso de un hormigón preparado para el que se tengan documentadas experiencias anteriores de su empleo en otras obras, siempre que sean fabricados con materiales componentes de la misma naturaleza y origen, y se utilicen las mismas instalaciones y procesos de fabricación. Además, la Dirección Facultativa puede eximir también de la realización de los ensayos característicos de dosificación cuando, además de las condiciones anteriores, se dé alguna de las siguientes circunstancias¹:

- el hormigón que se va a suministrar está en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido,
- se dispone de un certificado de dosificación, de acuerdo con lo indicado anteriormente.



Algunos de los defectos en cimentaciones especiales señalados en el apartado de Introducción pueden aparecer por incidencias que podrían haber sido resueltas con una experimentación previa: evolución de la consistencia en el tiempo, influencia de la elevación de la temperatura ambiente, efecto de la mezcla de distintos aditivos, efecto de un retraso en el suministro, etc. Así lo exige el Código Técnico⁶ para el caso particular de pantallas, que establece que la dosificación a utilizar debe contar con los ensayos previos pertinentes, así como con ensayos característicos que hayan puesto de manifiesto que, con los equipos y materiales empleados, se alcanzan las características previstas del hormigón. En cualquier caso, son muchas las razones que hacen recomendable proceder en estos casos a la realización de estos ensayos previos y característicos:

- Los hormigones de cimentaciones especiales requieren unas características específicas que los hacen diferentes a otros tipos de hormigones estructurales (gran fluidez y su mantenimiento durante largo plazo, gran cohesión, baja exudación, etc), por lo que resulta muy recomendable proceder a la realización de ensayos antes del inicio de las obras, con objeto de ajustar y optimizar las dosificaciones apropiadas.
- Siempre incorporan aditivos plastificantes o superplastificantes. La Instrucción EHE expresamente indica que cuando se utilicen aditivos hay que justificar¹, mediante los oportunos ensayos, que la sustancia agregada en las proporciones y condiciones previstas produce el efecto deseado sin perturbar excesivamente las restantes características del hormigón, ni representar peligro para la durabilidad del hormigón ni para la corrosión de las armaduras.
- También muy frecuentemente incorporan aditivos retardadores, y ocasionalmente aditivos aireantes, por lo que se debe comprobar el efecto de los diferentes aditivos al utilizarse mezclados. Asimismo debe comprobarse el efecto de los aditivos si se utilizan adiciones tales como cenizas volantes (ver capítulo 3, apartado 5).
- Dado que el comportamiento de los aditivos puede variar con las condiciones particulares de cada obra, tipo y dosificación de cemento, naturaleza de los áridos, etc., es muy recomendable la realización de ensayos previos en todos y cada uno de los casos y muy especialmente cuando se empleen cementos diferentes del tipo CEM I.

A continuación se describen los aspectos que deben ser cubiertos en la realización de los ensayos previos y característicos del hormigón.

7.4.3 Ensayos previos del hormigón

El objetivo de los ensayos previos es demostrar experimentalmente sobre hormigones fabricados en laboratorio, que con los materiales, dosificación y proceso de ejecución previstos es posible conseguir un hormigón que posea las condiciones de resistencia y durabilidad que se le exigen en el proyecto¹. El Código Técnico prescribe la realización de estos ensayos para el ajuste de la dosificación en el caso particular de pantallas⁶. En general, y para el caso de hormigones de cimentaciones especiales, los ensayos previos son recomendables ya que serán útiles para comprobar también otras especificaciones importantes que permitan la correcta colocación del hormigón:

- En el caso de utilizar aditivos superplastificantes, se debe asegurar que su dosificación no provoque efectos secundarios y mantenga unas condiciones adecuadas en la fluidez del hormigón durante el período completo del hormigonado de cada pilote o pantalla⁶.

- Si se utilizan retardadores de fraguado, al determinar el período de trabajabilidad del hormigón deben tenerse en cuenta posibles interrupciones de suministro, así como el tiempo necesario para el vertido².
- Se debe controlar que la docilidad y fluidez del hormigón se mantienen durante todo el proceso de hormigonado, efectuando ensayos de consistencia sobre muestras de hormigón fresco para definir su evolución en función del tiempo, especialmente en caso de emplear aditivos superplastificantes, tal como indica para el caso particular de las pantallas el Código Técnico de la Edificación⁶. Se considera adecuado comprobar en estos ensayos que la consistencia del hormigón que se va a colocar mantiene aún un cono de Abrams igual o superior a 100 mm después de cuatro horas⁶, según se indicó en el Capítulo 5, apartado 4.2. En este sentido, la FHA¹⁶ expresamente establece que la dosificación del hormigón adoptada debe ser comprobada mediante un ensayo de evolución de la consistencia con el tiempo tras el amasado, que se realice a la misma temperatura ambiente que la real de trabajo (un aumento de temperatura de 10 °C incrementa la velocidad de aumento de consistencia por un factor 2 aproximadamente) (ver Capítulo 3, apartado 7).
- Comprobar que la dosificación adoptada no origina exudación, y en su caso reajustarla para impedir que se produzca.

Estos ensayos deben realizarse antes del comienzo de la obra, de acuerdo con la Instrucción EHE. Asimismo, es recomendable realizarlos con los mismos materiales y dosificación que van a ser utilizados en la obra, especialmente el cemento, ya que el comportamiento de un mismo aditivo con diferentes cementos (incluso pertenecientes al mismo tipo y categoría resistente) puede presentar variaciones. Del mismo modo, cualquier cambio en el suministro de los materiales componentes del hormigón durante la obra, especialmente el caso del cemento, puede variar el funcionamiento del aditivo (ver Capítulo 3, apartado 5).

Para la realización de los ensayos previos y en cuanto a la resistencia se refiere, la Instrucción EHE señala que se deben fabricar al menos cuatro amasadas consecutivas con la dosificación adoptada, llenando dos probetas por amasada para su ensayo a compresión a los 28 días de edad, siendo la resistencia de la amasada el valor medio de ambas probetas. Con los resultados de la rotura de las probetas, se obtiene el valor de la resistencia media de las cuatro amasadas en el laboratorio f_{cm} , que debe cumplir¹:

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 8 \text{ (N/mm}^2\text{)}.$$

La Norma EN 1536:2008² para pilotes señala, que salvo que se especifique lo contrario, deben prepararse tres amasadas de prueba, llenándose de cada una 6 cubos o cilindros. Dos deben ensayarse a 7 días y dos a 28 días, los dos restantes deben reservarse por si fueran necesarios resultados adicionales, hasta que el hormigón haya sido aceptado.

7.4.4 Ensayos característicos del hormigón

Los ensayos característicos tienen la finalidad de comprobar la idoneidad de los materiales componentes, las dosificaciones y las instalaciones a emplear en la fabricación del hormigón, en relación con su capacidad mecánica y su durabilidad. Para ello, se deben utilizar hormigones



fabricados en las mismas condiciones de la central y con los mismos medios de transporte con los que se hará el suministro a la obra¹.

Estos ensayos deberían realizarse siempre que se haya ajustado la dosificación en Ensayos previos, para comprobar en condiciones reales de obra las pruebas realizadas en laboratorio.

Por otra parte, y dadas las características particulares del hormigón empleado en cimentaciones especiales, es muy importante este control del hormigón para asegurar que no se producirán problemas durante la ejecución. En estos ensayos pueden comprobarse aspectos específicos tales como tiempos de transporte y su incidencia en la trabajabilidad del hormigón, posibilidad de incorporación de aditivos en obra, etc.

Los criterios adoptados como resultado de estos ensayos pueden necesitar un reajuste final con el hormigonado del primer elemento (pantalla o pilote) al comienzo de la obra, tras la comprobación del vertido a través de la tubería Tremie. En el caso concreto del hormigonado de pilotes de barrena continua, dicho reajuste vendrá condicionado por la aptitud para el bombeo del hormigón así como las operaciones posteriores de colocación de las armaduras.

7.4.4.1 Ensayos característicos de resistencia

Los ensayos característicos de resistencia deben llevarse a cabo a los 28 días de edad sobre probetas procedentes de seis amasadas diferentes, para cada tipo de hormigón que vaya a emplearse en la obra. Se deben enmoldar dos probetas por amasada. Para la resistencia a compresión, se calcula el valor medio correspondiente a cada amasada a partir de los resultados individuales de rotura, lo que permite obtener una serie de seis resultados medios¹:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_6$$

La Dirección facultativa debe aceptar la dosificación y el proceso de ejecución correspondiente, a los efectos de resistencia, cuando se cumpla que¹:

$$\bar{x}_6 - 0,8 \cdot (x_6 - x_1) \geq f_{ck}$$

Puede resultar útil ensayar varias dosificaciones iniciales, pues si se prepara una sola y no se alcanza con ella el comportamiento adecuado, hay que comenzar de nuevo el proceso, con el consiguiente retraso para la obra¹.

7.4.4.2 Ensayos característicos de dosificación para comprobar la durabilidad

Los ensayos característicos de dosificación tienen por objeto comprobar, previamente al inicio del suministro del hormigón, que las dosificaciones a emplear son conformes con los criterios de durabilidad establecidos en la Instrucción EHE. Dichos ensayos serán de determinación de la resistencia a compresión y de la profundidad de penetración de agua bajo presión¹. Estos ensayos son obligatorios para hormigones en todos los ambientes, salvo los ambientes I, IIa y IIb. En el caso de que se efectúen también ensayos característicos de resistencia, podrán efectuarse simultáneamente con éstos.

Previamente al inicio del suministro, se debe proceder a la realización de tres series de cuatro probetas, procedentes de tres amasadas fabricadas en la central con la misma dosificación que se vaya a emplear en la obra. De cada serie, dos probetas se destinarán al ensayo de resistencia y otras dos al ensayo de profundidad de penetración de agua. La toma de muestras debe realizarse en la misma instalación en la que va a fabricarse el hormigón durante la obra. La selección del momento para realizar la citada operación, así como la del laboratorio encargado de la fabricación, conservación y ensayo de estas probetas deben ser previamente acordadas por el responsable de la recepción del hormigón, el suministrador del mismo y, en su caso, el constructor¹.

La profundidad de penetración de agua bajo presión en el hormigón, se debe¹ ensayar según UNE-EN 12390-8:2001. Antes de iniciar el ensayo, se debe someter a las probetas a un período de secado previo de 72 horas en una estufa de tiro forzado a una temperatura de 50 ± 5 °C.

Los valores medios de los dos resultados individuales de los ensayos de profundidad de penetración de agua obtenidos para cada serie, se deben ordenar de acuerdo con el siguiente criterio¹:

- las profundidades máximas de penetración: $Z_1 \leq Z_2 \leq Z_3$
- las profundidades medias de penetración: $T_1 \leq T_2 \leq T_3$

Para su aceptación, el hormigón ensayado deberá cumplir simultáneamente las siguientes condiciones¹:

Clase de exposición ambiental	Especificaciones para las profundidades máximas	Especificaciones para las profundidades medias
IIIc, Qc Qb (sólo en el caso de elementos pretensados)	$Z_m = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{3} \leq 30mm$ $Z_3 \leq 40 \text{ mm}$	$T_m = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \leq 20mm$ $T_3 \leq 27 \text{ mm}$
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	$Z_m = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{3} \leq 50mm$ $Z_3 \leq 65 \text{ mm}$	$T_m = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} \leq 30mm$ $T_3 \leq 40 \text{ mm}$
I, IIa, IIb (sin clase específica)	No requiere esta comprobación	No requiere esta comprobación

A partir de los valores obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión, se determinan los resultados medios para cada serie¹, $x_1 \leq x_2 \leq x_3 \dots$

La resistencia característica mínima compatible con los criterios de durabilidad se define aplicando una de las siguientes expresiones¹:



- en el caso de que se realicen simultáneamente ensayos característicos de resistencia, con seis series de probetas: $f_{c,dosif} = \bar{x}_6 - 0,8 \cdot (x_6 - x_1)$
- en otro caso, con tres series de probetas: $f_{c,dosif} = \bar{x}_3 - 1,35 \cdot (x_3 - x_1)$

donde x_i es la resistencia media de un número "i" de series ensayadas.

La Dirección facultativa debe aceptar el inicio del suministro del hormigón cuando se cumplan que el valor de $f_{c,dosis}$ no es inferior al valor de f_{ck} establecido en el proyecto, ni es inferior en más de 5 N/mm^2 respecto a la establecida en la tabla 37.3.2.b de la Instrucción EHE¹.

7.4.5 Control durante el hormigonado

El control de recepción se aplica tanto al hormigón preparado, como al fabricado en central de obra y debe incluir una serie de comprobaciones de carácter documental y experimental, incluyendo su comportamiento en relación con la docilidad, la resistencia y la durabilidad, además de cualquier otra característica que, en su caso, establezca el pliego de prescripciones técnicas particulares.

En cuanto a las comprobaciones experimentales, éstas son de aplicación a la unidad de producto, entendiendo con tal la cantidad de hormigón fabricada de una sola vez. Normalmente se asocia el concepto de unidad de producto a la amasada, si bien en algún caso y a efectos de control, se podrá tomar en su lugar la cantidad de hormigón fabricado en un intervalo de tiempo determinado y en las mismas condiciones¹. De acuerdo con esta especificación de la Instrucción EHE, en centrales de hormigón preparado donde el hormigón se suministra a obra mediante camiones, la unidad de control o amasada debe entenderse como el volumen de hormigón transportado por el camión. Esto es así incluso en el caso de centrales amasadoras, en las que la carga del camión en la planta se realiza con más de una amasada, aunque el control en obra se aplica a la totalidad del volumen de hormigón transportado.

Adicionalmente, la Instrucción especifica que cualquier característica medible de una amasada debe venir expresada por el valor medio de un número de determinaciones igual o superior a dos¹. Para los casos habituales de medida de la consistencia y la resistencia, esto implica la necesidad de realizar para el control de la amasada dos veces el ensayo del cono de Abrams, y llenar como mínimo dos probetas para las roturas a compresión.

7.4.5.1 Control documental

Cada partida de hormigón empleada en la obra debe ir acompañada de una hoja de suministro. Su contenido mínimo viene indicado en el Anejo 21 de la Instrucción EHE, y como datos relevantes debe indicar, entre otros:

- Datos relativos al envío: central suministradora, peticionario, obra y camión de transporte. Fecha y hora de entrega, tiempo límite de colocación del hormigón.
- Datos relativos al hormigón: designación, dosificación y cantidad suministrada,

- Datos relativos a los materiales componentes: tipo y cantidades de cemento, adiciones y aditivos, en su caso .

La Dirección Facultativa debe comprobar la conformidad de esta documentación con las especificaciones de la Instrucción EHE y con el certificado de dosificación aportado previamente¹.

7.4.5.2 Toma de muestras

La toma de muestras se debe realizar de acuerdo con lo indicado en UNE EN 12350-1:2006, pudiendo estar presentes en la misma los representantes de la Dirección Facultativa, del Constructor y del Suministrador del hormigón. Salvo en los ensayos previos, la toma de muestras se debe realizar en el punto de vertido del hormigón, a la salida de éste del correspondiente elemento de transporte y entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ de la descarga¹.

Si se requiere (por ejemplo, durante el hormigonado en tiempo frío o caluroso, ver Capítulo 4, apartado 4.3.3), debe medirse la temperatura del hormigón en los recipientes¹⁵. Esta medida resulta totalmente recomendable en el hormigón de cimentaciones especiales, por el importante efecto de la temperatura del hormigón en la evolución de consistencias durante su colocación. El control de la temperatura puede ayudar a explicar problemas ocasionales durante la colocación, que pueden estar originados por la llegada a obra de hormigones con temperatura elevada, ocasionada por ejemplo por la utilización de "cemento caliente".

El representante del laboratorio debe levantar un acta para cada toma de muestras, que deberá estar suscrita por todas las partes presentes, quedándose cada uno con una copia de la misma. Su redacción obedecerá a un modelo de acta, aprobado por la Dirección Facultativa al comienzo de la obra. El Constructor o el Suministrador de hormigón pueden requerir la realización, a su costa, de una toma de contraste¹.

Una vez fabricadas las probetas, de acuerdo con la norma UNE EN 12390-2, se deben mantener en el molde, convenientemente protegidas, durante al menos 16 horas y nunca más de tres días, en función la temperatura y la categoría resistente del hormigón (Tabla 7.1). Durante su permanencia en la obra no deben ser golpeadas ni movidas de su posición y se deben mantener a resguardo del viento y del sol directo. En este período, la temperatura del aire alrededor de las probetas debe estar comprendida entre los límites de la Tabla 7.1. En el caso de que puedan producirse en obra otras condiciones ambientales, el Constructor debe habilitar un recinto en el que puedan mantenerse las referidas condiciones¹.

Tabla 7.1: Rangos de temperatura del aire alrededor de las probetas

Rango de temperatura	f_{ck} (N/mm ²)	Periodo máx. de permanencia de las probetas en obra
15 °C – 30 °C	< 35	72 horas
	≥ 35	24 horas
15 °C – 35 °C	cualquiera	24 horas



El efecto de las altas y bajas temperaturas sobre la evolución de resistencias del hormigón fue detallado en el apartado 4.3.3 del capítulo 4. Por ello, es importante que el Laboratorio que realiza el control indique siempre en su parte de toma de muestras el día y la hora de llenado de las probetas, así como el día y la hora en que se llevan al laboratorio para su conservación, y las temperaturas máximas y mínimas registradas en la zona de almacenamiento de las probetas durante su estancia en obra.

7.4.5.3 Control de la docilidad

La docilidad del hormigón se debe¹ comprobar mediante la determinación de la consistencia del hormigón fresco por el método del asentamiento, según UNE EN 12350-2:2006.

Los ensayos de consistencia del hormigón fresco se deben realizar cuando se produzca alguna de las siguientes circunstancias¹:

- cuando se fabriquen probetas para controlar la resistencia,
- siempre que lo indique la Dirección Facultativa o lo establezca el Pliego de prescripciones técnicas particulares

Adicionalmente a los casos generales anteriores recogidos por la Instrucción EHE, para el caso particular de cimentaciones especiales resulta recomendable si se están produciendo incumplimientos reiterados de consistencia del hormigón a su llegada a obra, y con la aprobación de la Dirección de Obra, proceder a una toma de muestras para comprobar la consistencia en todos los camiones antes de su descarga. Estas tomas deben realizarse de acuerdo con el suministrador al comienzo de la descarga, al objeto de no colocar una cierta cantidad de hormigón que posteriormente puede no cumplir la consistencia requerida. En estos casos puede realizarse además una segunda toma entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{3}{4}$ de la descarga (de acuerdo con la Instrucción EHE) para los ensayos de resistencia en los camiones que así se requiera de acuerdo con el control inicialmente programado.

La especificación para la consistencia es la recogida en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o, en su caso, la indicada por la Dirección de Obra.

Para la valoración de la consistencia, se deben realizar dos determinaciones del cono de Abrams. Se debe aceptar el hormigón cuando la media de los dos valores esté comprendida dentro de la tolerancia, tanto si se define por su asiento como por su tipo¹.

Para el caso específico del hormigón de cimentaciones especiales, es habitual la utilización de consistencias muy fluidas, con asientos en el cono de Abrams superiores a los 150 mm, y que pueden alcanzar los 220 mm (ver apartado 4.2 del Capítulo 5). En esta aplicación, y debido a la especial importancia que tiene la consistencia en la correcta colocación del hormigón, es recomendable no definirla por su tipo (líquida), ya que en ese caso se asocia un intervalo admisible según la Instrucción EHE de 14-22 cm que puede ocasionar problemas si el hormigón que se suministra se ajusta al límite inferior. Resulta más recomendable definirla por su asiento y acordar previamente con el suministrador una tolerancia más estricta que la fijada por la Instrucción EHE (de valor ± 3 cm en el intervalo 13-18 cm). Así, por ejemplo, podría solicitarse el suministro de hormigón con asiento 18 cm y tolerancia $-1/+3$ cm. Es importante recordar que en todos los casos esta consistencia debe conseguirse mediante la utilización de aditivos químicos, y no añadiendo excesiva agua al hormigón.

En la determinación de la consistencia mediante el cono de Abrams, como medida de la docilidad del hormigón, se recuerda la gran importancia de realizar e interpretar correctamente el resultado del ensayo (ver apartado 4.1 del Capítulo 5) en el hormigón de cimentaciones especiales, en las que en ningún caso se debe colocar en obra un hormigón que no cumpla con los requisitos de consistencia exigidos. Asimismo, la norma UNE EN 12350-2:2006 expresamente señala que el ensayo sólo es válido si se produce un correcto asentamiento (simétrico y sin derrumbamientos) de la masa del hormigón. Con este criterio, también deberían ser rechazados aquellos hormigones en los que en la realización del ensayo se dé esta circunstancia.

Teniendo en cuenta que la medida de la consistencia del hormigón se asocia al llenado de probetas para el control de la resistencia según la Instrucción EHE, esta medida se realizará con la frecuencia que señala la Tabla 7.4, seleccionado el menor lote resultante al aplicar los diferentes criterios recogidos en dicha tabla.

La normativa europea específica de pilotes² recomienda los siguientes ensayos de control del hormigón fresco, incluyendo en ellos no únicamente la consistencia, sino también el tiempo de trabajabilidad, tal como aparece indicado en la Tabla 7.2:

Tabla 7.2: Ensayos de consistencia y periodo de trabajabilidad para pilotes².

Parámetro	Ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información del pilote
Consistencia	- Inspección visual - Cono de Abrams o - Mesa de sacudidas	- Cada camión (inspección visual) - Comprobaciones puntuales (cono o mesa)	Albarán de entrega	X
Periodo de trabajabilidad	Comprobación del periodo de trabajabilidad (cono o mesa a las 4 horas)	En el primer pilote		X

Para el caso de pantallas, la normativa europea³ recomienda además de los anteriores también un control de temperatura, tal como aparece indicado en la Tabla 7.3:

Tabla 7.3: Ensayos de consistencia, temperatura del hormigón y periodo de trabajabilidad para pantallas².

Parámetro	Ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información del pilote
Consistencia Periodo de trabajabilidad	- Inspección visual - Cono de Abrams o - Mesa de sacudidas - Comprobación del periodo de trabajabilidad (cono o mesa a las 4 horas)	- Cada camión (inspección visual) - Un ensayo de cono o mesa por panel al comienzo	Albarán de entrega	X
Temperatura	Termómetro	- Comprobaciones puntuales - En caso de duda	Albarán de entrega	X

Un incremento de control de consistencia puede estar justificado en el hormigón de cimentaciones especiales, ya que garantizar la necesaria fluidez del hormigón resulta especialmente crítico, al tratarse de un hormigón que no se compacta y, por tanto, en el que cualquier problema de consistencia tendrá una repercusión directa en la compacidad alcanzada del hormigón de la cimentación. Además, debe tenerse en cuenta que no se puede apreciar visualmente el punto de colocación para detectar posibles incidencias.

Asimismo puede ser conveniente realizar también controles de la temperatura del hormigón, por su especial influencia en la consistencia y en su evolución en el tiempo, aspectos críticos en estos elementos.

7.4.5.4 Control de la resistencia

La resistencia a compresión del hormigón se debe¹ comprobar mediante ensayos efectuados sobre probetas fabricadas y curadas según UNE-EN 12390-2:2001 y ensayadas a compresión según UNE EN 12390-3:2003. Estos ensayos se deberían realizar sobre probetas cilíndricas de 15x30 cm (como mínimo dos por cada amasada controlada), sobre las cuales está basado todo el proceso de cálculo de la Instrucción EHE. También se pueden emplear probetas cúbicas de 15 cm de arista, en cuyo caso los resultados deben afectarse del correspondiente factor de conversión indicado en la Instrucción EHE (artículo 86.3.2).

Para su consideración al aplicar los criterios de aceptación para la resistencia del hormigón, el recorrido relativo de un grupo de tres probetas obtenido mediante la diferencia entre el mayor resultado y el menor, dividida por el valor medio de las tres, tomadas de la misma amasada, no puede exceder el 20%; en el caso de dos probetas, el recorrido relativo no puede exceder el 13%¹.

En general, la comprobación de las especificaciones para el hormigón endurecido, se debe llevar a cabo mediante ensayos realizados a la edad de 28 días¹. Sin embargo, dado que el uso de cenizas o grandes cantidades de adiciones puede retardar la ganancia de resistencia, en hormigones que las incorporen se podrían realizar los ensayos de resistencia más tarde, por ejemplo a los 56 días, con la aprobación de la Dirección Facultativa. Esta posibilidad aparece expresamente recogida en la normativa ACI¹¹. La Instrucción EHE (art. 31.3) permite asimismo que, en las obras en las que el hormigón no vaya a estar sometido a solicitaciones en los tres primeros meses a partir de su puesta en obra, pueda referirse la resistencia a compresión a la edad de 90 días¹.

El control de resistencia tiene la finalidad de comprobar que la resistencia del hormigón realmente suministrado a la obra es conforme a la resistencia característica especificada en el proyecto. La frecuencia y los criterios de aceptación aplicables a los ensayos son función de¹:

- a) en su caso, la posesión de un distintivo de calidad y su tipo, y
- b) la modalidad de control que se adopte en el proyecto:
 - Modalidad 1. Control estadístico.
 - Modalidad 2. Control al 100 por 100.

Existe una tercera modalidad denominada Control indirecto, en la que sólo es objeto de control la consistencia del hormigón, y que no es de aplicación a las cimentaciones especiales.

7.4.5.4.1 Control estadístico

Definición de los lotes

El control estadístico de la resistencia del hormigón de cimentaciones especiales durante el suministro es el de aplicación más general en las obras de hormigón estructural. Para el control de la resistencia, el hormigón de la obra se divide en lotes previamente al inicio de su suministro. El lote es la cantidad de hormigón controlada que se acepta o rechaza de una vez. Para el caso particular de cimentaciones especiales, los criterios de definición de lotes se recogen en la Tabla 7.4. En el establecimiento de los lotes, además, deben tenerse en cuenta ciertos requisitos¹:

- El número de lotes no debe ser inferior a tres.
- Todas las amasadas de un lote deben proceder del mismo suministrador, estar elaboradas con los mismos materiales componentes y tener la misma dosificación nominal.
- No se deben mezclar en un lote hormigones que pertenezcan a columnas distintas de la Tabla 7.4.
- La definición de los lotes recogidos en la tabla mencionada, pueden requerir una juiciosa adaptación en casos particulares, cuando su aplicación directa conduzca a muestreos excesivamente pequeños o grandes.



Tabla 7.4: Tamaño máximo de los lotes de control de la resistencia, para hormigones sin distintivo de calidad oficialmente reconocido

Límite superior	TIPO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	
	Elementos o grupos de elementos que funcionan fundamentalmente a compresión (pilotes)	Elementos o grupos de elementos que funcionan fundamentalmente a flexión (pantallas)
Volumen de hormigón	100 m ³	
Tiempo de hormigonado	2 semanas	
Superficie construida	500 m ²	1.000 m ²
Número de plantas	2	

De la tabla anterior se seleccionará el criterio que dé lugar al mayor número de lotes. Para el caso particular de cimentaciones especiales, el criterio de "superficie construida" debe entenderse como el lote formado por los elementos de la cimentación bajo la correspondiente superficie de forjado. El criterio de número de plantas puede aplicarse como el lote formado por las pantallas o pilotes correspondientes a dos niveles de sótano. La aplicación de estos criterios al caso de pantallas y pilotes de gran diámetro suele llevar con frecuencia a que el lote resultante se corresponde con el criterio de volumen de hormigón colocado, es decir, se divide la cimentación en lotes de control cada 100 m³ de hormigón.

En obras con grandes volúmenes de vertido de hormigón, como el caso de ciertas cimentaciones profundas, resulta complicado que éste sea suministrado por una única planta. Por ello, la Instrucción EHE indica que cuando el lote abarque hormigones procedentes de más de una planta, la Dirección Facultativa debe optar por una de las siguientes alternativas¹:

- subdividir el lote en sublotes a los que se deben aplicar de forma independiente los criterios de aceptación que procedan;
- considerar el lote conjuntamente, procurando que las amasadas controladas se correspondan con las de diferentes orígenes y aplicando las consideraciones de control que correspondan en el caso más desfavorable.

La primera alternativa supone controlar por separado el hormigón procedente de cada planta suministradora, pero su aplicación en la práctica obliga a que todo el hormigón procedente de una misma planta se coloque en un mismo sublote, al que debe aplicarse el criterio de aceptación o rechazo. Este sistema podría utilizarse, por ejemplo, si se está realizando vertido simultáneo en dos elementos diferentes de la misma obra, controlando que en cada elemento se vierte hormigón de una sola planta.

En la segunda alternativa, los hormigones de diferentes plantas se mezclan en el mismo lote, y se aplica el criterio de aceptación o rechazo correspondiente a la planta suministradora de caso más desfavorable (casos 1, 2 y 3 tal como se describen en el apartado "Criterios de aceptación del lote").

Cuando un lote esté constituido por amasadas de hormigones en posesión de un distintivo oficialmente reconocido, puede aumentarse su tamaño multiplicando los valores de la Tabla 7.4 por cinco, o por dos si se trata de un distintivo de calidad transitorio (definido en el apartado 4.1). En estos casos de tamaño ampliado del lote, deben cumplirse las condiciones siguientes:

- El número mínimo de lotes será de tres
- Cada lote debe corresponder, si es posible, a elementos incluidos en columnas diferentes de la Tabla 7.4.
- En ningún caso, un lote podrá estar formado por amasadas suministradas a la obra durante un período de tiempo superior a seis semanas.

En el caso de que se produjera un incumplimiento al aplicar el criterio de aceptación correspondiente, la Dirección Facultativa no aplicará el aumento del tamaño mencionado en el párrafo anterior para los siguientes seis lotes. A partir del séptimo, si en los seis anteriores se han cumplido las exigencias del distintivo, la Dirección Facultativa volverá a aplicar el tamaño del lote definido originalmente. Si por el contrario, se produjera algún nuevo incumplimiento, la comprobación de la conformidad durante el resto del suministro se efectuará como si el hormigón no estuviera en posesión del distintivo de calidad¹.

Número de amasadas controladas por lote

La conformidad del lote en relación con la resistencia se debe comprobar a partir de los valores medios de los resultados obtenidos sobre dos probetas tomadas para cada una de las N amasadas controladas, de acuerdo con la Tabla 7.5¹.

Tabla 7.5: Número de amasadas controladas.

Resistencia característica especificada en proyecto f_{ck} (N/mm ²)	Hormigón con distintivo de calidad oficialmente reconocido con nivel de garantía conforme con el apartado 5.1 del Anejo 19	Otros casos
$f_{ck} \leq 30$	$N \geq 1$	$N \geq 3$
$35 \leq f_{ck} \leq 50$	$N \geq 1$	$N \geq 4$
$f_{ck} \geq 50$	$N \geq 2$	$N \geq 6$

Las tomas de muestras se deben realizar aleatoriamente entre las amasadas de la obra sometida a control.

Criterios de aceptación del lote

Antes de iniciar el suministro del hormigón de un lote, la Dirección Facultativa debe comunicar al Constructor, y éste al Suministrador, el criterio de aceptación aplicable.



CEDEX

Una vez efectuados los ensayos del lote, se deben ordenar los valores medios de las determinaciones de resistencia obtenidas para cada una de las N amasadas controladas¹:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_m \leq \dots \leq x_N$$

Los criterios de aceptación de la resistencia del hormigón para esta modalidad de control, se definen a partir de la siguiente casuística¹:

Caso 1: hormigones en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido con un nivel de garantía conforme al apartado 5.1 del Anejo 19 de la Instrucción EHE.

Caso 2: hormigones sin distintivo.

Caso 3: hormigones sin distintivo, fabricados de forma continua en central de obra o suministrados de forma continua por la misma central de hormigón preparado, en los que se controlan en la obra más de treinta y seis amasadas del mismo tipo de hormigón.

Para cada caso, se debe proceder a la aceptación del lote cuando se cumplan los criterios establecidos en la Tabla 7.6¹.

Tabla 7.6: Criterios de aceptación de los lotes.

Caso de control estadístico	Criterio de aceptación	Observaciones
Control de identificación		
1	$x_i \geq f_{ck}$	
Control de recepción		
2	$f(\bar{x}) = \bar{x} - K_2 r_N \geq f_{ck}$	
3	$f(x_{(1)}) = x_{(1)} - K_3 s_{35}^* \geq f_{ck}$	A partir de la amasada 37ª, $2 \leq N \leq 6$ A las amasadas anteriores a la 37ª, se les aplicará el criterio nº2
(1) El valor de σ puede sustituirse por $\delta \cdot \bar{x}$		

donde:

x_i es cada uno de los valores medios obtenidos en las determinaciones de resistencia para cada una de las amasadas ensayadas,

$\bar{x}$ es el valor medio de los resultados obtenidos en las N amasadas ensayadas,

σ es el valor de la desviación típica correspondiente a la producción del tipo de hormigón suministrado, en N/mm², y certificado en su caso por el distintivo de calidad

δ es el valor del coeficiente de variación de la producción del tipo de hormigón suministrado y certificado en su caso por el distintivo de calidad,

f_{ck} es el valor de la resistencia característica especificada en el proyecto,

$x_{(1)}$ es el valor mínimo de los resultados obtenidos en las últimas N amasadas,

r_N es el valor del recorrido muestral definido como $r_N = x_N - x_1$

s es el valor de la desviación típica muestral, definida como $s_N = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}_N)^2}$

s_{35}^* es el valor de la desviación típica muestral, correspondiente a las últimas 35 amasadas,

K_2 y K_3 , son coeficientes que toman los valores reflejados en la Tabla 7.7:

Tabla 7.7: Valores de K_2 y K_3 en función del número de amasadas ensayadas

Coeficiente	Número de amasadas ensayadas			
	3	4	5	6
K_2	1,02	0,82	0,72	0,66
K_3	0,85	0,67	0,55	0,43

Para hormigones en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido con un nivel de garantía conforme al apartado 6 del Anejo 19 de la Instrucción EHE¹, el criterio de aceptación a emplear será $f(\bar{x}) = \bar{x} - 1,645\sigma \geq f_{ck}$

En el caso de hormigones en posesión de un distintivo de calidad oficialmente reconocido con el máximo nivel de garantía (no el distintivo transitorio), el control de recepción debe entenderse como un control de identificación, por lo que los criterios de aceptación en este caso tienen por objeto comprobar la pertenencia del hormigón del lote a una producción muy controlada, con una resistencia certificada y estadísticamente evaluada con un nivel de garantía muy exigente. Por ello, en este caso incluso se admite que si se produce un resultado no aceptable de acuerdo con el criterio definido en la Tabla 7.6, la Dirección Facultativa puede aceptar el lote cuando los valores individuales obtenidos en cada amasada ensayada sean superiores a $0,90 \cdot f_{ck}$ y siempre que, además, tras revisar los resultados de control de producción correspondientes al período más próximo a la fecha de suministro del mismo, se cumpla¹:

$$\bar{x} - 1,645 \cdot \sigma \geq 0,90 \cdot f_{ck}$$

donde $\bar{x}$ es el valor medio del conjunto de valores que resulta al incorporar el resultado no conforme a los catorce resultados del control de producción que sean temporalmente más



próximos al mismo, y σ es el valor de la desviación típica correspondiente a la producción del tipo de hormigón suministrado, en N/mm^2 , y certificado en su caso por el distintivo de calidad.

7.4.5.4.2 Control de la resistencia del hormigón al 100 por 100

El control de la resistencia del hormigón al 100 por 100 es de aplicación a cualquier estructura, siempre que se adopte antes del inicio del suministro del hormigón. La conformidad¹ de la resistencia del hormigón se comprueba determinando la misma en todas las amasadas sometidas a control y calculando, a partir de sus resultados, el valor de la resistencia característica real, $f_{c,real}$.

En la mayoría de las obras no suele utilizarse este tipo de control por el elevado número de probetas que implica, la complejidad de todo orden que supone para la obra y al elevado costo de control. Sin embargo, en algunos casos especiales, tales como elementos aislados de mucha responsabilidad, en cuya composición entra un número pequeño de amasadas u otros similares, puede resultar de interés el conocimiento de $f_{c,real}$ para basar en él las decisiones de aceptación o rechazo, con eliminación total del posible error inherente a toda estimación¹.

Para elementos fabricados con N amasadas, el valor de $f_{c,real}$ corresponde a la resistencia de la amasada que, una vez ordenadas las N determinaciones de menor a mayor, ocupa el lugar $n = 0,05 N$, redondeándose n por exceso. Cuando el número de amasadas que se vayan a controlar sea igual o menor que 20, $f_{c,real}$ será el valor de la resistencia de la amasada más baja encontrada en la serie¹.

El criterio de aceptación para esta modalidad de control se define por la siguiente expresión¹:

$$f_{c,real} \geq f_{ck}$$

7.4.5.4.3 Decisiones derivadas del control de resistencia

En los casos de no conformidad con los criterios de aceptación del lote descritos en los apartados anteriores, la Dirección Facultativa debe valorar la aceptación, refuerzo o demolición de los elementos construidos con el hormigón del lote no conforme, de acuerdo con el resultado de los ensayos de información, tal como se detalla en el apartado 6¹.

7.4.5.4.4 Control de la resistencia en la normativa para cimentaciones especiales

En el caso de la normativa específica de aplicación para cimentaciones especiales, destaca la Norma² EN 1536:2008, cuya definición de lotes para el control de la resistencia del hormigón en obras de pilotes, difiere de la contenida en la Instrucción EHE. Según esta normativa la toma de muestras para ensayo a compresión del hormigón que no se encuentre bajo un sistema certificado de control de calidad se debe realizar de la siguiente manera:

- Una muestra por cada uno de los tres primeros pilotes de la obra.
- En los siguientes, una muestra cada cinco pilotes (cada 15 pilotes si el volumen por unidad fuera igual o menor de 4 m^3).
- Dos muestras adicionales después de interrupciones de los trabajos superiores a los 7 días.

- Una muestra cada 75 m³ de hormigón vertido en el mismo día (40 m³ según el ACI¹¹).
- Al menos una muestra por cada pilote hormigonado cuyos esfuerzos requieran el uso de hormigón de clase C35/45 (designación europea correspondiente a un hormigón con resistencia de proyecto 35 N/mm² en probeta cilíndrica, 45 N/mm² en probeta cúbica de acuerdo con la norma UNE EN 206) ó superior.
- Se exige la utilización como mínimo de tres cubos o cilindros para el control de la amasada.

Para asegurar la calidad del hormigón, el ACI¹⁴ exige tomar como mínimo una muestra de cuatro probetas (para ensayar la resistencia a los 28 días) por cada pilote, aunque no más de una muestra por camión hormigonera. El Contratista además debe enviar al laboratorio de ensayo los albaranes con la dosificación del hormigón y proporcionar el tiempo pasado y el número de rotaciones de la cuba desde el amasado.

Para el caso de pantallas, la normativa europea³ recoge un control de resistencia cada 300 m³ de hormigón, llenando tres cilindros o cubos.

Todas las frecuencias indicadas de control tienen carácter de recomendación, no son normativas. Adicionalmente, tanto la normativa europea de pantallas como la de pilotes señalan que si el hormigón se confecciona con un sistema continuo y certificado de aseguramiento de la calidad, es posible acordar condiciones de toma de muestras de hormigón diferentes².

En casos especiales se pueden requerir tomas de muestras y ensayos adicionales, por ejemplo en pilotes sobre roca, pilotes aislados, casos de altas tensiones de flexión, etc².

7.4.6 Certificado final del hormigón suministrado

Al finalizar el suministro de un hormigón a la obra, el Constructor debe facilitar a la Dirección Facultativa un certificado de los hormigones suministrados, con indicación de los tipos y cantidades de los mismos, elaborado por el Fabricante y firmado por persona física con representación suficiente¹.

7.5 Control de ejecución

La Instrucción EHE indica que durante la construcción de la estructura, la Dirección Facultativa debe controlar la ejecución de cada parte de la misma verificando su replanteo, los productos que se utilicen y la correcta ejecución y disposición de los elementos constructivos. Debe efectuar cualquier comprobación adicional que estime necesaria para comprobar la conformidad con lo indicado en el proyecto, la reglamentación aplicable y las órdenes de la propia Dirección Facultativa. Comprobará que se han adoptado las medidas necesarias para asegurar la compatibilidad entre los diferentes productos, elementos y sistemas constructivos¹.

Asimismo, la norma EN 1536:2008² indica que el control de la ejecución debe realizarse de acuerdo con las especificaciones de proyecto. Para ello, debe designarse un responsable cualificado y con experiencia.

El proceso de vertido y puesta en obra del hormigón constituye una de las sucesivas actividades dentro del proceso completo de ejecución de pilotes y pantallas. Sin embargo, y debido a las



particularidades asociadas a la colocación del hormigón en estos elementos (necesidad de un hormigón con características específicas, imposibilidad de compactación del hormigón, utilización de tubo Tremie, hormigonado bajo lodos, etc), esta fase del control cobra una especial importancia en este tipo de obras. Es por ello que puede ser necesario desarrollar con mayor detalle de lo que es habitual en elementos estructurales convencionales el plan de control de esta fase, así como tomar precauciones especiales para garantizar su cumplimiento.

La Dirección Facultativa debe llevar a cabo el control de la ejecución de pilotes o pantallas, mediante:

- la revisión del autocontrol del Constructor.
- el control externo de cada lote de la ejecución, mediante la realización de inspecciones puntuales

En los siguientes apartados se desarrollarán con mayor detalle ambos requisitos aplicados al caso particular de la actividad dentro de la ejecución que comprende los trabajos de colocación del hormigón en cimentaciones especiales, objeto de la presente publicación.

7.5.1 Plan de autocontrol del Constructor en las actividades de vertido y puesta en obra del hormigón

El Constructor tiene la obligación de definir y desarrollar un sistema de seguimiento, que permita comprobar la conformidad de la ejecución. Para ello, debe elaborar un plan de autocontrol que incluya todas las actividades y procesos de la obra e incorpore, contemplando las particularidades de la misma, el programa previsto para su ejecución y que deberá ser aprobado por la Dirección Facultativa antes del inicio de los trabajos¹. Las operaciones de vertido y puesta en obra del hormigón constituyen una de las actividades dentro de la ejecución de pilotes y pantallas y por consiguiente deben estar contempladas en dicho plan de autocontrol. Para la parte de la ejecución que comprende la puesta en obra del hormigón de cimentaciones especiales, algunos aspectos importantes que debe recoger dicho plan están desarrollados en los apartados 5.2.2 a 5.2.4. Adicionalmente, también es conveniente que contemple:

- Programación que incluya la duración estimada y secuencia de hormigonado
- Disposición de los equipos de colocación si hubiera más de uno
- Plantas de hormigón que realizarán el suministro, su distancia a la obra y el tiempo estimado de transporte de acuerdo con las condiciones esperables de tráfico.
- Velocidad de llegada de camiones a obra coordinada con la velocidad estimada de colocación del hormigón
- Itinerario de los camiones en el interior de la obra, hasta el punto de vertido y su salida de la misma
- Particularidades, en su caso, en la realización de la toma de muestras del hormigón
- Sistema de gestión de los materiales, productos y elementos que se vayan a colocar en la obra, de manera que se asegure la trazabilidad de los mismos¹.
- Si se va a realizar un control de ejecución intenso, sistema de gestión para garantizar la trazabilidad de los camiones dentro de cada lote¹
- Si se van a añadir aditivos en obra, precisar la cantidad, tipo, tiempo de amasado suplementario y requisitos adicionales de comprobación del comportamiento mediante ensayo en su caso.

- El plan de autocontrol debería recoger las correspondientes comprobaciones a realizar de los requisitos de colocación del hormigón, recogidos en el apartado "4. Puesta en obra".
- El plan debería asimismo contemplar la frecuencia de las comprobaciones de autocontrol que se realizarán para garantizar su cumplimiento, como mínimo de acuerdo a lo exigido en la Tabla 7.10.

Algunos de los puntos anteriores van encaminados a evitar retrasos en la llegada de los camiones o esperas prolongadas de los mismos en obra, que pueden influir negativamente en la evolución de la consistencia del hormigón y ocasionar problemas durante el vertido.

En el Pliego de Condiciones Técnicas Generales del Ayuntamiento de Madrid se recogen con gran nivel de detalle todos los aspectos que debe incluir el Plan de autocontrol del Constructor, el cual debe entregarse antes de iniciar la ejecución de los pilotes y con una antelación mínima de 30 días¹⁹.

La Dirección Facultativa debe realizar una comprobación del autocontrol del Constructor, de acuerdo con el plan aprobado y para cada unidad de inspección (Tablas 7.9 y 7.10).

7.5.2 Control de la ejecución mediante inspección de los procesos

7.5.2.1 Programación del control de ejecución

Antes de iniciar la ejecución de la estructura, la Dirección Facultativa debe aprobar el Programa de control de la ejecución, que debe identificar, entre otros aspectos, los siguientes¹:

- niveles de control
- lotes de ejecución
- unidades de inspección
- frecuencias de comprobación.

A los efectos de la Instrucción EHE, se contemplan dos niveles de control¹:

- a) Control de ejecución a nivel normal
- b) Control de ejecución a nivel intenso

El control a nivel intenso sólo es aplicable cuando el Constructor esté en posesión de un sistema de la calidad certificado conforme a la UNE-EN ISO 9001¹.

La utilización de uno u otro nivel de control será fijada por el proyecto. Si se adopta un control de ejecución a nivel intenso, la Instrucción permite una reducción de los coeficientes parciales de seguridad del acero y del hormigón, siempre que éstos ostenten distintivos de calidad oficialmente reconocidos. También este nivel de control permite utilizar un coeficiente parcial de seguridad mayor (si el efecto es favorable) ó menor (si el efecto es desfavorable) en la fuerza de pretensado..



El Programa de control debe contemplar una división de la obra en lotes de ejecución, coherentes con el desarrollo previsto en el Plan de obra para la ejecución de la misma (apartado 5.1) y conformes con los siguientes criterios¹:

1. Se debe corresponder con partes sucesivas en el proceso de ejecución de la obra.
2. No se deben mezclar elementos de tipología estructural distinta.
3. Para el caso particular de cimentaciones especiales, el tamaño del lote no debe ser superior al indicado en la Tabla 7.8.

Tabla 7.8: Lotes de ejecución

Tipo de obra	Cimentaciones
Edificios	– Pilotes y encepados correspondientes a 250 m² de superficie – 50 m de pantallas
Puentes	– Pilotes y encepados correspondientes a 500 m² de superficie, sin rebasar tres cimentaciones – 50 m de pantallas
Chimeneas, torres, depósitos	– Pilotes y encepados correspondientes a 250 m² de superficie – 50 m de pantallas

La Instrucción EHE señala unas unidades de ejecución objeto de control en cada lote, según se refleja en la Tabla 7.9, siendo el vertido y la puesta en obra del hormigón una de dichas actividades, sin mayor nivel de detalle.

Para cada lote de ejecución, se debe identificar la totalidad de los procesos y actividades susceptibles de ser inspeccionadas, que se designan “unidades de inspección”¹.

Se entiende por unidad de inspección la dimensión o tamaño máximo de un proceso o actividad comprobable, en general, en una visita de inspección a la obra. En función de los desarrollos de procesos y actividades previstos en el Plan de obra, en cada inspección a la obra de la Dirección Facultativa o de la entidad de control, puede comprobarse un determinado número de unidades de inspección, las cuales, pueden corresponder a uno, o más lotes de ejecución¹.

Para cada proceso o actividad, se deben definir las unidades de inspección correspondientes cuya dimensión o tamaño debe ser conforme al indicado en la Tabla 7.9¹, tomada de la Instrucción EHE, seleccionando únicamente aquellas actividades relacionadas con la colocación de armaduras y hormigón en cimentaciones especiales. Para las actividades relacionadas con la puesta en obra del hormigón, dicha tabla contiene la unidad máxima de inspección atendiendo a criterios de tiempo de colocación, volumen de hormigón y número de amasadas.

Tabla 7.9: Tamaño máximo de las unidades de inspección.

Unidades de ejecución	Tamaño máximo de la unidad de inspección
Despiece de planos de armaduras diseñadas según proyecto	- Planillas correspondientes a una remesa de armaduras.
Montaje de las armaduras, mediante atado	- Conjunto de armaduras elaboradas cada jornada
Montaje de las armaduras, mediante soldadura	- Conjunto de armaduras elaboradas cada jornada
Colocación de armaduras	- Cada jaula de armadura
Vertido y puesta en obra del hormigón	- Una jornada - 120 m ³ - 20 amasadas

Para cada proceso o actividad incluida en un lote, el Constructor debe desarrollar su autocontrol y la Dirección Facultativa debe proceder a su control externo, mediante la realización de un número de inspecciones que varía en función del nivel de control definido en el Programa de control y de acuerdo con lo indicado en la Tabla 7.10¹.

Tabla 7.10: Número de inspecciones que deben realizarse en cada actividad del lote.

Procesos y actividades de ejecución	Número mínimo de actividades controladas externamente por unidad de inspección			
	Control normal		Control intenso	
	Autocontrol del Constructor	Control externo	Autocontrol del Constructor	Control externo
Despiece de planos de armaduras diseñadas según proyecto	1	1	1	1
Montaje de armaduras, mediante atado	15	3	25	5
Montaje de armaduras, mediante soldadura	10	2	20	4
Geometría de las armaduras elaboradas	3	1	5	2
Colocación de armaduras	3	1	5	2
Vertido y puesta en obra del hormigón	3	1	5	2



La Dirección Facultativa, con la asistencia técnica de una entidad de control en su caso, debe comprobar para cada una de las actividades relacionadas en la Tabla 7.10, el cumplimiento de las exigencias básicas de la Instrucción EHE, efectuando las inspecciones según la tabla anterior, lo especificado en el proyecto o lo ordenado por la Dirección Facultativa¹.

En los apartados siguientes se desarrollarán los aspectos concretos que deben ser comprobados en estas inspecciones, es decir, se van a concretar las "unidades de inspección" de aplicación para el caso específico de las actividades de vertido y puesta en obra del hormigón en cimentaciones especiales.

7.5.2.2 Comprobaciones antes del vertido

La Dirección Facultativa debe comprobar, antes del inicio del suministro del hormigón, que se dan las circunstancias para efectuar correctamente su vertido¹. Los aspectos concretos que deben ser comprobados se desarrollan en este apartado.

Como **comprobación documental** la Instrucción EHE señala que antes del inicio de la ejecución de cada parte de la obra, la Dirección facultativa debe constatar que existe un programa de control de recepción, tanto para los productos como para la ejecución, que haya sido redactado específicamente para la obra, conforme a lo indicado por el proyecto y lo establecido en la Instrucción EHE¹. Se debe constatar antes del comienzo del hormigonado, por tanto, que la fase de vertido está correctamente desarrollada en el plan de autocontrol del Constructor, y que existe un programa de control de recepción de las operaciones de vertido y un programa de control de recepción del hormigón de la obra.

Es potestativo de la Dirección Facultativa realizar una **visita de inspección a la central de hormigón** antes del inicio del suministro, comprobar que se ha implantado un control de producción y que dispone de un sistema de gestión de los acopios. Estas inspecciones son recomendables cuando los hormigones no estén en posesión de un distintivo de calidad y cuando se trate de hormigones con $f_{ck} \geq 50 \text{ N/mm}^2$ o con características especiales¹, como es el caso de los utilizados para cimentaciones especiales.

En cuanto a **la ubicación y dimensiones de los elementos**, previamente a la colocación de la armadura, se debe comprobar que los ejes de los elementos, las cotas y la geometría de las secciones presentan unas posiciones y magnitudes dimensionales cuyas desviaciones respecto al proyecto son conformes con las tolerancias indicadas en el Anejo nº 11 de la Instrucción EHE, para los coeficientes de seguridad de los materiales adoptados en el cálculo de la estructura. En el caso de pilotes ejecutados en obra, se debe comprobar las dimensiones de las perforaciones¹.

Por otro lado, para evitar posibles **afecciones del terreno al hormigón**, es necesario comprobar antes de iniciar el hormigonado que el nivel freático y las condiciones hidrogeológicas se ajustan a las previstas, y que no se detectan corrientes subterráneas que puedan producir socavación o arrastres⁶.

Antes del inicio del suministro de hormigón, la Dirección Facultativa debe comprobar que se dispone de **los medios adecuados para su puesta en obra**. En el caso de temperaturas extremas, se debe comprobar que se han tomado las precauciones necesarias¹.

En cuanto al **control de las armaduras**, esta actividad constituye una fase previa pero independiente del vertido y puesta en obra del hormigón, con su propio control de ejecución tal como se aprecia en la Tabla 7.10. En cualquier caso, la Instrucción señala que se debe

comprobar la geometría real de la armadura montada y su correspondencia con los planos de proyecto, la disposición de los separadores, la conformidad de la unión entre armaduras (en el caso de soldadura, se debe recabar del Constructor el correspondiente certificado, firmado por persona física, en el que se garantice su comportamiento mecánico) y las longitudes de anclaje y solapo¹.

La normativa europea de pilotes y pantallas señala que los aspectos concretos de la ejecución relacionados con la puesta en obra del hormigón que deben ser controlados y registrados antes del vertido son^{2,3}:

- limpieza de la perforación
- comprobación del fluido de estabilización
- tipo de armaduras, dimensiones, montaje y longitud
- profundidad y posicionamiento de la armadura
- instalación de elementos de hormigón prefabricado o tubos de armado

7.5.2.3 Comprobaciones durante el vertido

Los aspectos concretos de la ejecución de pilotes y pantallas que deben ser controlados y registrados durante el vertido incluyen, de acuerdo con la normativa europea^{2,3}:

colocación del hormigón, cantidad, duración, secuencia de ascenso y elevación final

- recuperación de camisas provisionales
- recuperación de tubo Tremie
- duración de cada una de las operaciones durante el vertido
- cualquier no conformidad debe ser notificada

Resulta de especial importancia controlar el volumen de hormigón que se va colocando en el pilote o pantalla y compararlo con el volumen teórico de llenado; si es significativamente menor, el pilote ha podido experimentar estrechamientos de la sección de hormigón, colapso de las paredes laterales de la excavación o contaminaciones del hormigón en el tubo Tremie. Si se sospecha la existencia de un defecto semejante, hay que investigar el estado del pilote o rehacerlo antes de que el hormigón fragüe⁷.

Así, la normativa europea expresamente señala que se deben comprobar y anotar, durante el vertido, el volumen colocado y la altura del hormigón dentro de la perforación. El método y la secuencia de las comprobaciones y de las anotaciones se ajustarán a las dimensiones y al tipo de pilote o pantalla y tendrán que ser acordados previamente al inicio de los trabajos. Los niveles tendrán que ser controlados por lo menos una vez después de cada amasada (camión) o antes o después de que se extraiga el entubado provisional. En concreto, para pilotes de diámetro inferior a 0,6 m, puede ser suficiente que se tome nota del hormigonado de los primeros 10 pilotes de la obra y de un porcentaje del resto de los pilotes².

Se debe comprobar que no se produce segregación durante la colocación del hormigón¹.

Para el control de la continuidad de pilotes ejecutados con hélice continua, la supervisión de la construcción del pilote debe incluir el control del aporte de hormigón, la presión de hormigonado, la velocidad de extracción y el registro de rotación de la hélice². El control permanente de la presión y volumen de hormigón en estos pilotes resulta de especial importancia por diversos aspectos:



- El control permanente de la presión permite asegurar que no hay cortes en la sección.
- La aplicación continua de presión produce en los suelos malos un aumento del diámetro efectivo de los pilotes.
- En cualquier suelo el efecto de la presión asegura la continuidad del contacto entre el hormigón y el suelo a lo largo del fuste mejorando el rozamiento lateral.
- El control automático del volumen inyectado y su comparación instantánea con respecto al teórico por observación directa en una pantalla sita en la cabina del maquinista permite detectar en tiempo real la aparición de problemas, la identificación precisa de en qué cota se producen y proceder, si fuese necesario, a su reparación repitiendo el tramo de pilote cuestionado mediante reperforación y reinyección.

Durante el hormigonado de los pilotes de barrena continua por el tubo central se pueden producir problemas de desprendimientos del terreno, contaminando el hormigón, si la elevación de la barrena se realiza a una velocidad no acorde con la aportación por bombeo del hormigón. Por ello es conveniente que la realización de estas operaciones se ejecute con sumo cuidado y se instrumente el proceso¹³.

7.5.2.4 Comprobaciones después del vertido

Con carácter general, una vez finalizada la ejecución de cada fase de la estructura, se debe efectuar una inspección de la misma, al objeto de comprobar que se cumplen las especificaciones dimensionales del proyecto¹. En el caso de que el proyecto adopte en el cálculo unos coeficientes de ponderación de los materiales reducidos, se debe comprobar que se cumplen específicamente las tolerancias geométricas establecidas en el proyecto¹. En el apartado "5.2.6. Tolerancias" se incluyen valores específicos recomendados por la Instrucción EHE-08 para el caso de pantallas y pilotes.

Adicionalmente y para el caso de pantallas, una vez excavado el terreno, se debe comprobar la ausencia de defectos significativos en la superficie del hormigón. Si se detectaran coqueras, juntas en mal estado u otros defectos que, por sus características pudieran considerarse inadmisibles en relación con lo exigido, en su caso, por el proyecto, la Dirección Facultativa debe valorar la conveniencia de proceder a la reparación de los defectos y, en su caso, el revestimiento de las superficies¹.

En el caso de pilotes, se debe comprobar que el descabezado del hormigón no provoca daños ni en el pilote, ni en las armaduras de anclaje cuyas longitudes deberán ser conformes con lo indicado en el proyecto¹. Esta regla también es de aplicación a muros pantalla.

Asimismo, si se va a proceder a una inyección de los pilotes debe controlarse la composición de la mezcla y sus propiedades, zona de aplicación, tiempo, velocidad de suministro, presión y cantidad².

7.5.3 Parámetros de control y su frecuencia

En las siguientes Tablas se detallan ejemplos de parámetros que deben ser controlados y su periodicidad durante la ejecución del hormigonado, recogidos en las normas EN 1536:2008 y EN 1538:2008 de aplicación para pilotes y pantallas respectivamente^{2,3}.

Tabla 7.11. Control de las armaduras en pilotes².

Parámetro	Método o ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información del pilote
Confección de jaulas - Longitud - Barras - Separadores - Alineación - Atados - Rigidez	Inspección visual y mediciones	En cada jaula	Planos Certificado	X
Colocación de jaulas - Profundidad - Posición - Solapes	Mediciones	En cada jaula		
Elementos especiales (tubos para ensayos sónicos, equipos de auscultación, etc) - Posición - Profundidad - Conexiones con la jaula - Protección durante la colocación - Protección durante el hormigonado	Inspección visual y mediciones	En cada jaula		

Tabla 7.12: Control del vertido en pilotes perforados².

Parámetro	Método o ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información del pilote
Cota de hormigonado	Medida (registro de cota) Por encima del nivel de descabezado	Cada pilote y después: - de cada camión - de la recuperación del entubado	Especificaciones	X



CEDEX

Parámetro	Método o ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información del pilote
		- del hormigonado		
Inmersión del tubo Tremie	Medida (registro de longitud)	Cada camión		X
Volumen de hormigón	Medida (registro de volumen)	Cada pilote	Especificaciones	X
Hormigón en el nivel de descabezado	Resistencia a compresión sin confinar	Cada pilote	Especificaciones	

Tabla 7.13: Control de vertido en pilotes de hélice continua².

Parámetro	Método o ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información del pilote
Proceso de excavación: - Velocidad de rotación - penetración - profundidad - par motor (opcional)	- Medida	Cada pilote, continuamente	Procedimiento de construcción	
Hormigonado - Presión en el hormigón - Flujo del hormigón - Consumo correspondiente a la extracción de la hélice	- Medida	Cada pilote, al comienzo y continuamente	Procedimiento de construcción	

Tabla 7.14: Control específico de pilotes pre-pack².

Parámetro	Método o ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información del pilote
Tuberías de inyección: - diámetro - número - profundidad	Inspección visual	Cada pilote	Procedimiento de inyección	
Árido: - tamaño - cantidad	Albarán de entrega	Cada pilote		
Propiedades del mortero de inyección: - densidad - exudación - consistencia	Equilibrio del lodo Ensayo de flujo	Cada amasada	Procedimiento de inyección	
Proceso de inyección - rendimiento del bombeo - presión - volumen	Medida (valores registrados)	Cada pilote	Procedimiento de inyección	
Resistencia del mortero de inyección	Resistencia a compresión sin confinar	Cada pilote	Especificaciones	

Tabla 7.15. Control de las armaduras en muros pantalla³.

Parámetro	Método o ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información de la pantalla
Confección de jaulas	Inspección visual Control de longitud/anchura	En cada jaula	Planos	X



CEDEX

Parámetro	Método o ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información de la pantalla
	vertical y horizontal Comprobación de planos			
Colocación de jaulas - Altura/posición - Conexiones - Barras de elevación - Barras de suspensión	Inspección visual - Orientación - Localización y número de separadores - Número de alambres de atado para solapes - Nivelación y posición - Rigidez	En cada jaula	Documentación de construcción	X
Posición tras la instalación	- Elevación - Verticalidad del elemento - Posición horizontal	En cada elemento	Documentación de construcción	X

Tabla 7.16: Controles del vertido para los muros pantallas³.

Parámetro	Método o ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información de la pantalla
Inmersión del tubo Tremie	Medida (registro de longitud)	Cada camión	Documentación del proceso de construcción	X
Tiempos de colocación	Cumplimiento de tiempo	Cada camión		X
Cantidad vertida	Cuantificación del volumen de los camiones	Cada panel		X
Nivel del hormigón después del vertido (elevación)	Medida de la profundidad (plomada) Curva de hormigonado	Cada panel: - después de cada camión - después de cada movimiento del Tremie (s)	Documentación del proceso de construcción	X

Parámetro	Método o ensayo	Frecuencia	Documentación de proyecto	Registro de información de la pantalla
Extracción de juntas	Procedimiento de extracción Edad de la extracción	Cada junta	Documentación del proceso de construcción	X
Descabezado	Calidad del hormigón en la cota de descabezado	Cada panel	Documentación del proceso de construcción	X

7.5.4 Tolerancias

7.5.4.1 Pilotes

Para la medida de las desviaciones de ejecución se considerará que el centro del pilote es el centro de gravedad de las armaduras longitudinales, o el centro del mayor círculo inscrito en la sección de la cabeza del pilote para los no armados⁶.

La Instrucción EHE-08, en el Anejo 11, establece las siguientes tolerancias para la ejecución de pilotes¹:

- ❖ La desviación en planta del centro de gravedad de la cara superior de un pilote debe ser inferior a 10 cm, para el caso de control de ejecución normal, o de 5 cm, para el caso de control de ejecución intenso.
- ❖ La desviación en el nivel de la cara superior del pilote, una vez descabezado, puede estar situada entre – 60 mm y + 30 mm.
- ❖ La desviación en el diámetro (d) de la sección del pilote puede estar situada entre – 20 mm y + 0,1d (siendo como máximo de 100 mm).

Adicionalmente el PG-3⁴ y la nueva EN 1536² señalan que los pilotes se deben construir con los siguientes rangos de tolerancias:

- La excentricidad del eje del pilote respecto a la posición fijada debe ser inferior a 10 cm para pilotes de diámetro no superior a 1 m, y a la décima parte del diámetro en caso contrario, pero siempre inferior a 15 cm (según el Código Técnico⁶, la excentricidad debe ser inferior a la décima parte del diámetro en pilotes de diámetro inferior o igual a 1,5 m, y a 15 cm en el resto de los casos).
- Para pilotes verticales o con pendiente superior a quince (15V:1H), el error de inclinación no debe exceder el 2% del valor de la pendiente.



- Para pilotes inclinados con pendientes comprendidas entre quince (15V:1H) y cuatro (4V:1H), el error de inclinación no debe exceder del 4% del valor de la pendiente.
- La desviación en planta de ejes de ensanchamiento en relación con el eje del pilote debe ser inferior a la décima parte del diámetro².
- En cuanto a las armaduras, la elevación de la parte superior de la jaula una vez hormigonado el pilote debe² ser igual al valor nominal, con una desviación máxima de $\pm 0,15$ m.
- El descabezado del pilote debe² realizarse para preparar una junta de construcción con unas desviaciones máximas de $+0,04$ m/ $-0,07$ m respecto al nivel de descabezado de proyecto.

Las tolerancias de ejecución que indica el ACI¹⁴ son más estrictas en algún caso que las relacionadas anteriormente:

- El diámetro del pilote debe ser el establecido en planos.
- La tolerancia en la ubicación a la altura del descabezado no debe ser mayor que $1/24$ del diámetro del pilote ó 75 mm, el mayor de los dos valores. Si el pilote es mayor de lo especificado, se tomará como centro del pilote el centro de un círculo que tenga el área especificada y que quede dentro del pilote hormigonado realmente.
- La falta de verticalidad no será mayor del 1,5%. Si la sección transversal del pilote construido es mayor que la especificada tanto en el fondo de la excavación como en el descabezado, la falta de verticalidad debe medirse mediante:
 - El centro en el descabezado como se ha indicado anteriormente.
 - El centro en el fondo de la excavación se determinará del mismo modo que en el descabezado.
- La superficie en el fondo de la excavación no debe ser menor que la establecida en planos.
- El fondo de excavación debe ser plano, con una tolerancia de 1 vertical a 12 horizontal.
- Las desviaciones en horizontal y en vertical de los componentes individuales de anclaje se limitan a ± 15 mm.

Cuando se requieran tolerancias más estrictas que las anteriores, se deben establecer en el Pliego de condiciones del proyecto y, en cualquier caso, antes del comienzo de los trabajos^{2,6}.

Las tolerancias geométricas de construcción, para pantallas de pilotes, pueden ser más estrictas que las indicadas para pilotes, sobre todo en los casos en que se exige estanqueidad al agua o al suelo^{2,3}.

7.5.4.2 Pantallas

La Instrucción EHE no contempla tolerancias para el caso específico de pantallas de cimentaciones especiales ejecutadas mediante perforaciones profundas y hormigonadas bajo agua o fluido estabilizador.

El PG-3⁵ y la nueva EN 1538³ exigen para las pantallas de sostenimiento en cimentaciones especiales las siguientes tolerancias:

- La tolerancia de implantación de los paneles hormigonados "in situ", definida al nivel de los muretes-guía, y en el lado a excavar, debe ser de 20 mm (25 mm según la norma EN 1538³) en la dirección de la excavación principal y de 50 mm en la dirección opuesta^{3,5}.

- La anchura y la profundidad de la excavación no deben ser en ningún caso inferiores a los valores recogidos en Proyecto^{3,5}. La tolerancia en la longitud del panel no debe ser superior a 50 mm⁵.
- La tolerancia de verticalidad de los paneles debe ser del 1% de la profundidad total excavada. Cuando el terreno presente bolos y obstáculos, esta tolerancia puede ser aumentada, previa autorización del Director de las Obras^{3,5}. Así, la tolerancia, considerando el plano de la cara excavada, de los paneles hormigonados debe ser inferior a 100 mm en caso de protuberancias, e inferior a 20 mm en caso de agujeros. En el caso de protuberancias, puede aceptarse un valor superior al indicado cuando el suelo contenga elementos de tamaño superior a 100 mm o cuando el terreno esté blando o suelto^{3,5}.
- El "tecleo" o deslizamiento perpendicular a la superficie vista, entre dos paneles adyacentes debe estar comprendido en un intervalo compatible con el buen funcionamiento de la pantalla^{3,5}. El "tecleo" entre superficies contiguas de la junta no debe ser mayor⁵ de 150 mm.

Las desviaciones en la realización de las juntas, tanto en la dirección longitudinal como en la transversal, respecto a su posición vertical no deben sobrepasar un valor de $\pm 1\%$ de la profundidad total⁵.

La tolerancia en el ancho total de la jaula de armaduras es de ± 10 mm. La tolerancia sobre la cota superior de las jaulas de armadura, después del hormigonado, es de ± 50 mm, y sobre la posición horizontal de la jaula siguiendo el eje de la pantalla³, de ± 70 mm.

7.6 Control de la cimentación terminada: ensayos de información

La Instrucción EHE establece, que una vez finalizada la estructura, en su conjunto o alguna de sus fases, la Dirección Facultativa debe velar para que se realicen ensayos de información complementaria, es decir las comprobaciones y pruebas de carga exigidas en su caso por la reglamentación vigente que le fuera aplicable, además de las que pueda establecer voluntariamente el proyecto o decidir la propia Dirección Facultativa; determinando la validez, en su caso, de los resultados obtenidos¹.

La Instrucción no contempla ensayos de información específicos para el caso de cimentaciones especiales, que sí son recogidos por el Código Técnico de la Edificación. Así, éste establece que los ensayos de información sobre pilotes se pueden realizar para⁶:

- a) Probar la integridad del pilote.
- b) Comprobar el cumplimiento de las especificaciones.
- c) Estimar los parámetros de cálculo.
- d) Estimar la capacidad portante.
- e) Probar las características resistente-deformacionales en el rango de las acciones especificadas.

Los ensayos de pilotes pueden consistir en:

1. Ensayos de integridad;



CEDEX

2. Pruebas de carga:
 - a. Ensayos de carga estática;
 - b. Ensayos de carga semi-estática¹⁷
 - c. Ensayos de carga dinámica, o de alta deformación;
3. Ensayos con perforación del hormigón para obtención de testigos.

En la siguiente tabla se muestra la aplicación de algunos de los procedimientos de ensayo relacionados²:

Tabla 7.17: Aplicación de diferentes ensayos de información de cimentaciones especiales².

Tipo de ensayo	Aplicación		
	Prueba de capacidad portante límite	Prueba de deformación en condiciones de trabajo	Integridad estructural
Ensayo de integridad	No*	No	Sí*
Prueba de carga estática de penetración a velocidad constante	Sí*	Indicativa para terreno sin cohesión si es suficientemente lenta	No
Prueba de carga dinámica	Sí*	Posible*	Sí*

* sujeto a interpretación

En cuanto a la obtención de testigos de la estructura, estos ensayos suelen realizarse cuando se produce un incumplimiento en el criterio de aceptación de un lote (apartados 4.5.4.1 a 4.5.4.3).

Otro sistema de obtener información sobre el estado del hormigón de la cabeza y la zona más cercana a la superficie del pilote, es el de la excavación del terreno a su alrededor, a fin de comprobar visualmente el estado del material constituyente del cimiento. Este sistema queda limitado tanto por la profundidad a alcanzar como por la presencia del nivel freático¹⁸.

De los ensayos citados, sólo se van a desarrollar en este apartado aquellos directamente relacionados con la calidad del hormigón de cimentaciones especiales: los ensayos de integridad y los ensayos de obtención de testigos.

En los apartados siguientes se dan de forma sucinta algunos detalles sobre cada uno de los tres tipos de ensayos de integridad que se pueden aplicar. La referencia (8) contiene información detallada sobre los diferentes ensayos de aplicación en cimentaciones especiales.

7.6.1 Ensayos de integridad:

Los ensayos de integridad tienen por objeto verificar la continuidad del fuste del pilote y la resistencia mecánica del hormigón⁶. Los métodos no destructivos más usuales de control de la integridad y homogeneidad del hormigonado de cimentaciones profundas, son los siguientes⁸:

- Transparencia Sónica
- Ensayos de Eco
- Ensayos de Impedancia Mecánica

Estos tres métodos son los de mayor implantación tanto a nivel mundial como en nuestro país. Además, han sufrido un fuerte desarrollo sobre todo en los aspectos de miniaturización, aumentando el potencial de los equipos de toma y tratamiento de datos, siendo actualmente una gran herramienta de control de defectos en pilotes y pantallas perforadas⁸.

Antes de realizar ensayos de Transparencia Sónica, Eco o Impedancia Mecánica, es imprescindible disponer por parte de la empresa de control de unos determinados datos que le permitan realizar una interpretación correcta de los ensayos⁸:

- Identificación del elemento
- Las dimensiones y tipo de los pilotes a ensayar
- Situación en planta del elemento a auscultar en la obra
- Cotas de la cabeza y el fondo de perforación.

Además es importante conocer con la mayor precisión las condiciones geotécnicas del entorno, especialmente si el análisis se realiza mediante ensayos de Eco o de Impedancia Mecánica, ya que se pueden producir reflexiones de la señal en capas geotécnicas diferenciadas, pudiendo confundirse con cortes o anomalías a la cota de dichas capas⁸.

El conocimiento de la dosificación y características del hormigón y de las incidencias que se han producido tanto durante la excavación del pilote como en el suministro de hormigón y durante el proceso de hormigonado, es esencial para discernir, en el caso de que se hayan producido anomalías, cuáles pueden haber sido los motivos y así tener indicaciones para poder realizar las reparaciones que sean necesarias⁸.

En especial, siempre que se detecte la presencia de un defecto, conviene consultar los partes de ejecución, ya que en la gran mayoría de los casos el cruce de información proporciona la respuesta a las causas de las anomalías⁸.

7.6.1.1 Transparencia sónica en pilotes y pantallas

El método de la Transparencia Sónica para el control de cimentaciones consiste en el seguimiento a todo lo largo del fuste del pilote o de la pantalla, del tiempo que tarda en propagarse una onda de presión (llamada comúnmente onda sónica) desde un emisor a un receptor que están colocados en posiciones conocidas (Fig.4)⁸.

El ensayo se realiza introduciendo las sondas emisora y receptora en los tubos que se hayan instalado en los pilotes o pantallas o en los taladros que se hayan perforado en el hormigón. Hay que conocer la situación de los tubos en planta, las cotas de los extremos superiores de los

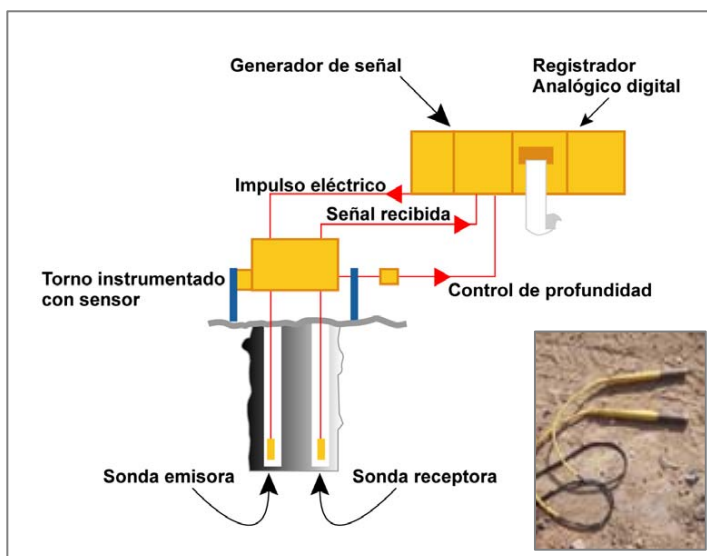


Figura 4. Esquema del sistema de transparencia

tubos y sus longitudes⁸.

Las sondas se introducen por los tubos previamente llenos de agua y se descenden, manteniéndolas a nivel hasta la punta del pilote. Con las sondas en el fondo y colocadas al mismo nivel se izan registrando a intervalos constantes de profundidad, el tiempo que la onda ultrasónica tarda en recorrer la distancia entre sondas, atravesando el hormigón que las separa⁸.

7.6.1.2 Técnicas de eco e impedancia mecánica en pilotes

Los ensayos de Eco y de Impedancia Mecánica, se basan en el análisis de la respuesta dinámica provocada por una pequeña fuerza axial, que se aplica en la cabeza del pilote mediante un martillo de mano. Las técnicas de Eco e Impedancia Mecánica, al contrario que la Transparencia Sónica que permite también ensayar pantallas, se utilizan exclusivamente en pilotes, y generalmente en los pilotes con diámetros menores y siempre en unas condiciones que permitan que las relaciones longitud/diámetro de los pilotes no sean elevadas⁸.

En el ensayo del Eco se provoca, con un martillo ligero de mano, un impacto en la cabeza del pilote. El impulso mecánico genera un tren de ondas que se transmite a lo largo del cilindro o barra a una velocidad que dependerá de las características del material. La respuesta del sensor que mide la vibración generada por el impacto del martillo (geófono o acelerómetro) se analiza en el tiempo. La onda reflejada permite obtener información de los cambios físicos que se ha encontrado la onda generada con el martillo al propagarse por el pilote (Fig.5)⁸. Esta técnica es

utilizable¹⁶ en pilotes de hasta 20 m de longitud, o con una relación longitud-diámetro máxima de 30.

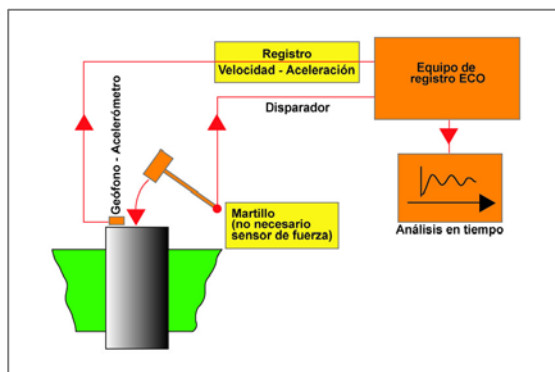


Figura 5. Esquema del ensayo de

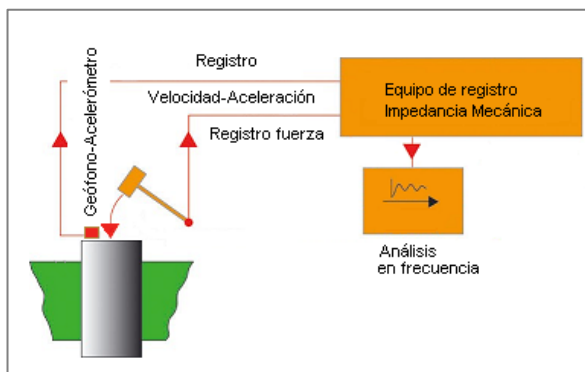


Figura 6. Esquema del ensayo de Impedancia

Como ensayos de Impedancia Mecánica en España se conocen a aquellos métodos que excitan la cabeza del pilote con una fuerza conocida y analizan la respuesta del pilote a cada una de las frecuencias de excitación. En esta técnica la respuesta del sensor (geófono o acelerómetro) se analiza en frecuencia, pero además se registra la fuerza (martillo instrumentado con un sensor de fuerza) y se obtiene la curva de movilidad como representación de la velocidad sobre la fuerza registrada en frecuencia (Fig. 6). La excitación puede causarse bien mediante la acción de un vibrador (métodos vibratorios) a distintas frecuencias, o por la acción de un impacto (métodos impulsionales) del que se analiza la respuesta a las distintas frecuencias que lo componen⁸.

7.6.1.3 Ventajas y limitaciones de los diferentes ensayos de integridad

7.6.1.3.1 Transparencia sónica

Como ventaja significativa, la Transparencia Sónica es el único método que, con un número suficiente de tubos, permite situar las irregularidades en planta y en profundidad con una gran precisión, con resoluciones en general del orden de 20 mm. También permite conocer el estado del hormigón de la punta del pilote si los tubos han sido instalados adecuadamente⁸.

De forma complementaria se obtiene la cota mínima necesaria de descabezado del pilote hasta alcanzar el hormigón sano con mucha precisión.

El método permite comprobar si un tratamiento de inyección ha sido eficaz para reparar un defecto en el pilote⁸.

Al contrario que en otros métodos, no está limitado a los pilotes y se puede ensayar pantallas. Tampoco es necesario que los pilotes estén descabezados para realizar el ensayo e incluso se



pueden realizar los ensayos una vez realizados los encepados si se han prolongado los tubos por encima de éstos⁸.

La Transparencia Sónica goza de una amplia implantación probablemente porque presenta la apariencia de ser un ensayo fácil de interpretar, pero conviene que los ensayos sean realizados e interpretados por personal especializado con experiencia y criterio, lo que evitará enjuiciamientos erróneos⁸.

Dentro de las limitaciones, para realizar el ensayo de Transparencia Sónica es necesario instalar la instrumentación antes del ensayo. Se deben colocar al menos un par de tubos solidarios con la armadura, sin embargo esto no suele complicar mucho el trabajo de montaje de la ferralla. También es necesario rellenar los tubos con agua y por tanto ésta tiene que estar disponible y en cantidad suficiente ya que el volumen necesario para rellenar y mantener el nivel no es despreciable⁸. Si los pilotes se construyen bajo fluidos estabilizadores, no está permitido el uso de tubos para ensayos sónicos en acero galvanizado u otra protección sin precauciones especiales, por entrañar el riesgo de acumulación de cake por efectos electrolíticos o problemas de corrosión electroquímica en las armaduras².

Otra limitación radica en que la investigación se limita al interior de las armaduras. La auscultación se reduce al área en el que se encuentran los tubos y siempre en el recorrido de la onda sónica⁸.

El método no permite en sí mismo detectar si los retrasos que se producen son debidos a la presencia de coqueras, al deslavado del hormigón, presencia de juntas entre hormigones, a inclusiones de lodo, etc., tan sólo detecta que existe un defecto. El método se debe de considerar como una técnica para evaluar la continuidad del pilote y la homogeneidad del hormigón de forma cualitativa⁸.

La técnica de transparencia sónica no proporciona información sobre la reacción pilote-suelo ni sobre condiciones de empotramiento en punta⁸.

7.6.1.3.2 Ensayos de Eco e Impedancia mecánica

Los métodos de Transparencia Sónica, Eco e Impedancia Mecánica, para comprobar la integridad de pilotes, no entorpecen de forma significativa la ejecución de la cimentación. Para realizar estos ensayos no es necesario tenerlo previsto durante la ejecución de los pilotes. En cambio hay que descabezar el pilote y en su caso regularizar pequeñas zonas de la superficie en donde se coloquen el geófono o acelerómetro y donde pueda golpear el martillo adecuadamente, por lo que sería conveniente tenerlo en cuenta en el cronograma de la obra⁸.

Si los pilotes están bien preparados para realizar el ensayo, se pueden auscultar un gran número de pilotes en un día. El ensayo se puede realizar tanto en pilotes perforados como en los prefabricados e hincados, siempre que la geometría sea cilíndrica o prismática y se cumplen las condiciones geométricas definidas anteriormente (esbeltez y diámetro máximo)⁸.

Si el registro es claro y se puede comparar la polaridad de la onda reflejada con la de la onda inicial, en el caso del Eco, o en la movilidad analizando la curva, se puede distinguir si la punta está empotrada o no, o si el reflejo lo produce una anomalía que aumenta o reduce la impedancia⁸.

Estos métodos permiten detectar ensanchamientos o empotramientos, proporcionando información sobre la reacción con el terreno⁸.

En determinados casos permiten la realización de ensayos de integridad incluso en pilas-pilote⁸.

Como primera limitación podría apuntarse que el análisis que se hace en oficina puede ser dificultoso y requerir el uso de simulaciones, análisis de señal, etc⁸. Los ensayos de Eco e Impedancia Mecánica son generalmente complicados de interpretar y requieren en obra y gabinete personal especializado y experimentado. Los métodos que asisten la interpretación y datos adicionales del ensayo de Impedancia Mecánica como la rigidez dinámica y la admitancia característica son una ayuda a la interpretación, que puede confirmar o al menos permite despreciar unos resultados de ensayo poco definidos⁸.

Dado que la interpretación es una de las limitaciones, es necesario solventarla lo máximo posible analizando, por ejemplo, la curva de Eco en tiempo y el registro de movilidad conjuntamente para alcanzar una interpretación común⁸.

La interpretación de los ensayos necesita suponer una velocidad de propagación de las ondas en un cilindro de hormigón. Al variar esta velocidad entre 3500 y 4000 m/s, la incertidumbre en la medida de distancias es del orden de un 10%. No se puede determinar el estado de la punta del pilote en cuanto a la limpieza del fondo de excavación y no proporciona ninguna información sobre la posición lateral de las anomalías observadas⁸.

Si existiesen varias anomalías a distintas profundidades, es difícil determinar la posición de las anomalías más profundas incluso con técnicas asistidas⁸.

Si en el terreno existen capas rígidas intercaladas, se pueden producir rebotes de la señal en estas capas dificultando la interpretación e incluso en algunos casos ocultando la respuesta del fondo del pilote⁸.

Realmente, incluso con estas limitaciones que hace que sean técnicas que no detectan todas las imperfecciones, son una buena herramienta para detectar defectos significativos y comprobar la longitud teórica de los pilotes de forma sencilla⁸.

En definitiva, estos ensayos deben considerarse sólo como un método basto de inspección, que es capaz de localizar únicamente defectos grandes, como inclusiones de suelo o longitudes de pilote erróneas. Por lo tanto, no deberían ser empleados como métodos de ensayo de la integridad primarios para pilotes de carga axial en los que las cargas de diseño superen el 40% de la capacidad estructural del pilote¹⁶.

Si los resultados de los ensayos sónicos o de impedancia mecánica revelan posibles anomalías, el Director de las Obras puede ordenar bien la comprobación del diseño teórico del pilote, bien la comprobación de la continuidad del pilote mediante sondeos, de cuya interpretación puede establecer la realización de pruebas de carga, la necesidad de reparación del pilote o el rechazo del pilote⁴.

7.6.1.4 Planificación de los ensayos de integridad

A la hora de elegir un método para verificar la integridad de pilotes conviene tener en cuenta las ventajas y limitaciones descritas en apartados anteriores. Normalmente para grandes diámetros y pilotes o pantallas continuas que alcanzan profundidades importantes, el método más apropiado es la Transparencia Sónica. En pilotes de pequeños diámetros con esbelteces



pequeñas ($L/D \leq 30$), los métodos más apropiados son el Eco o la Impedancia Mecánica. Realmente, siempre que sea posible, el método más recomendable desde el punto de vista de la rápida interpretación es el de la Transparencia Sónica. Pero no siempre es posible instalar tubos en pilotes, o a veces se toma la decisión de realizar ensayos cuando se sospecha que se ha producido alguna anomalía durante la ejecución y ya no es posible instalar los tubos. En estos casos, queda la posibilidad de recurrir a la Impedancia Mecánica o al ensayo por Eco⁸.

El número y la naturaleza de los ensayos se deben fijar en el Pliego de condiciones del proyecto y se debe establecer antes del comienzo de los trabajos. Según el Código Técnico de la Edificación⁶, el número de ensayos no debe ser inferior a 1 por cada 20 pilotes, salvo en el caso de pilotes aislados con diámetros entre 45 y 100 cm, que no debe ser inferior a 2 por cada 20 pilotes. En pilotes aislados de diámetro superior a 100 cm no debe ser inferior a 5 por cada 20 pilotes. Sin embargo, el PG-3⁴ recomienda, en el caso de pilotes aislados bajo un pilar, equipar todos los pilotes para su posible comprobación, y llevar a cabo pruebas del tipo señalado en, al menos, un pilote de cada tres. Los ensayos se pueden realizar sobre alguno de los pilotes de prueba, o bien sobre cualquiera de los de trabajo.

El Ministerio de Transporte francés, para obras civiles recoge, en la publicación "Pieux Forés recueil des regles de l'art", el número de pilotes a ensayar, en función del número de pilotes de que consta la obra, de la forma de trabajo del pilote y del número de pilotes por encepado (en grupos mayores o menores de cuatro) según la tabla siguiente⁸:

Tabla 7.18: Porcentaje de pilotes a ensayar (Ministerio de Transporte francés)

Forma de trabajo del pilote	Nº total de pilotes	Porcentaje a ensayar	
		4 ó menos pilotes por encepado	Más de 4 pilotes por encepado
Fuste	≤ 50	100%	Entre 50% y 100%
Fuste	> 50	100%	
Fuste y punta	≤ 50	100%	
Fuste y punta	> 50	Entre 50% y 100%	
Punta	≤ 50	100%	
Punta	> 50	Entre 50% y 100%	

7.6.2 Ensayos de extracción de testigos y ensayos no destructivos del hormigón

Los ensayos de control con perforación del hormigón para obtención de testigos, son considerados por la Instrucción EHE como ensayos de información complementaria del hormigón. Su objeto es estimar la resistencia del hormigón de una parte determinada de la obra por circunstancias especiales¹. El método permite también la observación por televisión de la perforación del testigo y ensayo sónico entre dos perforaciones de testigos⁷.

Sólo son preceptivos cuando lo contemple el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o cuando así lo exija la Dirección Facultativa en alguna de las siguientes circunstancias¹:

- cuando se detecta una anomalía en los ensayos de integridad
- cuando se haya producido un incumplimiento al aplicar los criterios de aceptación¹
- cuando no se dispone de suficiente número de resultados de control¹
- cuando existan dudas razonables sobre las condiciones de ejecución de obra posteriores a la fabricación de las probetas (transporte interno de obra, vertido y compactación del hormigón)¹.
- para seguir el progresivo desarrollo de resistencia en hormigones jóvenes, estimando así el momento idóneo para realizar la excavación o la puesta en carga de elementos estructurales¹.
- en estructuras con síntomas de deterioro o que han estado sometidas a determinadas acciones que podrían haber afectado a su capacidad resistente (sobrecargas excesivas, fuego, heladas, etc.)¹.
- por solicitud de cualquiera de las partes, cuando tengan dudas justificadas sobre la representatividad de los resultados obtenidos en el control experimental a partir de probetas de hormigón fresco¹.

En el caso de que se trate de la obtención de testigos por incumplimiento en el criterio de aceptación de un lote a partir de los resultados del control de resistencia, (apartados 4.5.4.1 a 4.5.4.3) se procede como se describe a continuación, a instancias de la Dirección Facultativa¹:

- a) Deben realizarse ensayos, al objeto de comprobar si la resistencia característica del hormigón real de la estructura se corresponde con la especificada en el proyecto. Dichos ensayos serán realizados por un laboratorio acordado por las partes.
- b) En el caso de que los ensayos de información confirmen los resultados obtenidos en el control, la Dirección Facultativa encargará la realización de un estudio específico de la seguridad de los elementos afectados por el hormigón del lote sometido a aceptación, en el que se compruebe que es admisible el nivel de seguridad que se obtiene con los valores de resistencia del hormigón realmente colocado en la obra. Para ello, deberá estimarse la resistencia característica del hormigón a partir de los resultados del control o, en su caso, a partir de ensayos de información complementaria.
- c) En su caso, la Dirección Facultativa podrá ordenar el ensayo del comportamiento estructural del elemento realmente construido, mediante la realización de pruebas de carga.

Los ensayos de control sobre probetas enmoldadas se desarrollan en condiciones ideales, por cuanto se compactan por personal de laboratorio, el curado se hace en condiciones óptimas, etc. En cambio, los testigos extraídos del elemento proceden de un hormigón que ha sido sometido a operaciones de transporte y colocación de obra, por lo que es habitual que rotos a compresión den resultados inferiores a los obtenidos durante el control²¹. Este aspecto tiene especial incidencia en el caso del hormigón de cimentaciones especiales, que debido al tipo de puesta en obra se coloca sin compactación ni curado alguno, por lo que las diferencias en las resistencias entre probetas de control y testigos extraídos pueden ser más acusadas. Es por este motivo que en el cálculo de estas cimentaciones suelen emplearse unos elevados coeficientes de minoración no aplicados a otros elementos estructurales de hormigón armado, tal como recoge normativa específica como el Código Técnico de la Edificación, la Guía de Cimentaciones en Carreteras y la ROM, utilizándose en consecuencia resistencias de cálculo bajas y por tanto muy conservadoras.

Por todo lo anterior, cuando se aplica a una cimentación especial el procedimiento a seguir en caso de incumplimiento del control de resistencia de un lote descrito anteriormente, suele ocurrir



que los resultados de resistencia de los testigos extraídos al efecto no alcancen la resistencia especificada en el proyecto (apartado a)) debido al sistema de puesta en obra utilizado. En estos casos, debe por tanto aplicarse el criterio recogido en el apartado b), valorando con los resultados reales de resistencia de los testigos el nivel de seguridad estructural en el que se encuentra el elemento de la cimentación. Este nivel de seguridad, a pesar de la bajada de resistencia del hormigón, sí puede llegar a ser aceptable debido a la reducida resistencia de cálculo utilizada en el proyecto de estos elementos.

En cimentaciones situadas en ambientes agresivos, en las que se produzca un incumplimiento del control de resistencia, aunque el cálculo a partir de los resultados de los testigos demuestre que se mantiene un nivel de seguridad estructural aceptable, la incertidumbre se plantea en cuanto a la durabilidad del elemento. Aunque la Instrucción EHE no indica nada al respecto, podría entenderse que la durabilidad está garantizada si la bajada de resistencia en los testigos no excede los 5 MPa respecto a la requerida en la tabla 37.3.2.b por la Instrucción para el ambiente considerado (ver apartado 4.4.2). En caso contrario, puede ser conveniente comprobar sobre los testigos si se cumplen los requisitos de penetración de agua para el ambiente considerado (ver apartado 5.3 del Capítulo 5), y si no fuera así realizar un estudio específico de valoración de la vida útil del elemento. El Anejo 9 de la Instrucción EHE describe un procedimiento para ello.

La realización de los ensayos de información, su planificación, así como los estudios de seguridad y los proyectos de refuerzo, en su caso, requieren la intervención de técnicos especializados¹. También se considera necesario recurrir a expertos en durabilidad, en el caso de plantearse incertidumbres al respecto.

Cuando se utilizan testigos para estimar de nuevo la resistencia del hormigón de un lote concreto, deben extraerse las muestras en lugares elegidos rigurosamente al azar y no de aquellas zonas donde se presume o se sepa con certeza que están las porciones de hormigón de las que formaban parte las muestras de las probetas del control, salvo otros fines. Puede tenerse en cuenta que, por diferencia de compactación y otros efectos, las probetas testigo presentan una resistencia algo inferior a la de las probetas moldeadas a igualdad de otros factores (condiciones de curado, edad, etc.)¹.

En el caso particular de pilotes, cuando se produce una anomalía en los ensayos de integridad o en las pruebas de carga, deben extraerse testigos en la zona donde se ha detectado la discontinuidad, al efecto de comprobar el estado del hormigón en esa sección y determinar su incidencia en el comportamiento estructural del pilote.

El proceso de extracción de probetas testigo provoca generalmente un cierto nivel de daño en el propio hormigón que se pretende evaluar, mediante la aparición de microfisuras que pueden tener su incidencia en los resultados obtenidos al proceder a su rotura a compresión. Por ello, se recomienda valorar la aplicación de factores de corrección de los resultados que permitan tener en cuenta tales efectos. A falta de datos específicos para cada caso, es habitual considerar que, para hormigones normales, el referido efecto provoca una disminución de un diez por ciento en la resistencia¹.

Cuando se temen defectos no próximos a la superficie del pilote, se puede llevar a cabo una perforación a todo lo largo del pilote, utilizando diámetros no muy grandes, del orden de 3 a 4 veces el tamaño del árido empleado en el hormigón. Esta perforación suele efectuarse después de sanear la parte superior, a efectos de fijar, lo mejor posible, el eje del pilote. El testigo obtenido se utiliza tanto para comprobar la continuidad del hormigón y la calidad de su apoyo en el terreno, como para preparar probetas para su posterior ensayo. El mayor inconveniente que presenta este sistema es la posibilidad de que se desvíe la perforación, o bien que el pilote sea

el que esté desviado. Sólo suele emplearse en pilotes de gran diámetro, superior a 1,2 m. Una alternativa es dejar un tubo en el pilote hasta cerca de la punta, y proceder a perforar a través de él¹⁸.

En el caso de hormigones de árido silíceo, la extracción del testigo resulta muy dificultosa y de mala calidad, puesto que la corona arrastra los áridos y puede destrozar la pasta de cemento¹⁸. Este efecto puede reducirse si se espera un tiempo prudencial para que el hormigón adquiriera resistencia suficiente. En general, puede resultar recomendable esperar al menos 14 días para la extracción. Asimismo, y siempre que sea posible deben tallarse las probetas para los ensayos de compresión de esbeltez 2 y eliminar las partes que embeban armaduras.

Si se utilizan probetas de esbeltez inferior a 2, pueden utilizarse coeficientes de paso para pasar a la probeta cilíndrica 15x30, que determina la resistencia característica¹². Los coeficientes son válidos hasta una esbeltez mínima de 1,0.

Altura/diámetro	2	1,75	1,50	1,25	1,00
Factor	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

Para valores intermedios de la esbeltez, se pueden interpolar los factores anteriores¹².

La norma "UNE EN 12504-1:01. Testigos: extracción, examen y ensayo a compresión"²⁰ contiene los siguientes requisitos referentes a los testigos de hormigón para su ensayo a compresión:

- La relación entre el tamaño máximo del árido y el diámetro del testigo tiene una importante influencia en la determinación de la resistencia cuando la relación es superior a 1:3.
- Si el testigo se talla para obtener varias probetas, cada una de ellas se marcará para indicar su posición y orientación con respecto al testigo original.
- Los testigos para determinar la resistencia a compresión no deberán contener ninguna armadura en la dirección del eje longitudinal o próxima a él.
- Se realizará una inspección visual del testigo para detectar anomalías.
- Los testigos con fisuras, coqueras o zonas sueltas no deberán ensayarse.
- Deberá eliminarse la arena u otro material suelto sobre la superficie de la probeta.

Para el caso de pantallas podría realizarse el empleo de métodos no destructivos fiables, como complemento de los anteriormente descritos y debidamente correlacionados con los mismos.

Entre los ensayos no destructivos podrían emplearse los métodos normalizados en UNE EN 12504-2:2002 y UNE EN 12504-4:2006, relativos a la determinación del índice de rebote y a la velocidad de propagación de ultrasonidos, respectivamente, y cuya fiabilidad está condicionada a combinar estos medios con la extracción de probetas testigo¹.

La Dirección facultativa debe juzgar en cada caso los resultados, teniendo en cuenta que para la obtención de resultados fiables la realización, siempre delicada de estos ensayos, debe estar a cargo de personal especializado¹.



Un sistema fácilmente asequible para comprobar visualmente el estado del material constituyente del pilote es el de excavación de pozos adyacentes al mismo, aunque este método queda limitado tanto por la profundidad a alcanzar como por la presencia del nivel freático¹⁸.

7.7 Registros del control

Todas las actividades relacionadas con el control deben quedar documentadas en los correspondientes registros, físicos o electrónicos, que permitan disponer de las evidencias documentales de todas las comprobaciones, actas de ensayo y partes de inspección que se hayan llevado a cabo, de manera que puedan ser incluidas, una vez finalizada la obra, en la documentación final de la misma¹.

La Instrucción EHE señala que durante la obra, el Constructor debe crear los siguientes registros relacionados con el control de la ejecución, que deben estar a disposición de la Dirección Facultativa, e incorporarse a la documentación final de la obra:

- Un registro permanentemente actualizado, donde se reflejen las designaciones de las personas responsables de efectuar en cada momento el autocontrol del constructor relativo a cada proceso de ejecución¹. Este Registro, por tanto, debe contener la designación de la persona responsable del autocontrol de la actividad de vertido y puesta en obra del hormigón por parte de la Constructora.
- Un registro físico o electrónico que contenga los resultados de todas las comprobaciones de autocontrol realizadas durante la ejecución, incluyendo el vertido.
- Un registro de suministradores de la obra, con identificación completa de los mismos y de los materiales y productos suministrados. Dicho registro deberá contener, por tanto, la identificación de las plantas que suministren (fabricación y transporte) el hormigón a la obra.
- Si el proyecto determina un nivel de control de ejecución intenso, debe disponerse un sistema de registro y seguimiento de las unidades ejecutadas que relacione éstas con las partidas de productos utilizados y, en su caso, con las remesas empleadas en las mismas, de manera que se pueda mantener la trazabilidad durante la ejecución de la obra. En su aplicación al proceso de vertido, este registro debe contener la identificación de los camiones que han colocado el hormigón en cada lote. Así, si se produjera algún problema o patología en alguno de los elementos estructurales, una vez relacionado éste con su lote de ejecución correspondiente, deberá poderse identificar qué camiones ha vertido el hormigón en dicho elemento.

El PG-3 obliga al Contratista a confeccionar un parte de trabajo de cada pilote en el que deben figurar al menos los siguientes datos específicamente relacionados con la colocación del hormigón⁴:

- La profundidad hasta la que se ha introducido la armadura, y la longitud y constitución de la misma.
- La profundidad del nivel de la superficie del agua o del lodo bentonítico en el taladro al comienzo del hormigonado.
- La utilización o no de trépano, indicando en su caso profundidad, peso y tiempo de empleo.
- La relación volumen de hormigón – altura alcanzada.
- La fecha y hora del comienzo y terminación del mismo.

Además, se puede realizar un registro continuo de parámetros en pilotes de barrena continua⁶.

Asimismo, la norma europea de cimentaciones especiales (pilotes² y pantallas³) indica que se deben tener partes completos de todos los ensayos realizados durante el hormigonado. Los resultados se deben anotar en el parte de hormigonado. Debe tomarse nota de la duración de cada operación. Debe notificarse cualquier disconformidad. Los partes de ejecución se deben someter, para su firma, al representante del cliente y/o al proyectista, según se estipule. Las Tablas 7.11 a 7.16 indican expresamente aquellas operaciones de la ejecución que conllevan un registro de control².

Los partes de ejecución constan de dos apartados principales:

- el primero hace referencia a determinada información general y de la localización de la obra: debe incluir datos del pilote (tipo, dimensiones, etc.), el método de construcción y las características del hormigón y las armaduras.
- el segundo aporta información específica relativa al procedimiento de construcción.

En la tabla 7.19 se recoge la información directamente relacionada con el hormigón que deben contener los partes de ejecución de pilotes y pantallas.

Tabla 7.19: Esquema de la información referente al hormigón que se debe recoger en los partes de ejecución de pilotes y pantallas

	Información	Pilotes entubados	Pilotes con lodos	Pilotes de barrena continua	Muros Pantalla
1	Información sobre las actividades anteriores al vertido de hormigón				
	1.1 Profundidad de la perforación	X	X	X	X
	1.2 Posición del nivel freático	X	X	X	X
	1.3 Características del lodo antes de hormigonar	-	X	-	(X)
	1.4 Profundidad de la entubado	X	-	-	-
2	1.5 Detalles de la armadura: longitud total, posición y peso de cada uno de los tramos la componen	X	X	X	X
	Información sobre la puesta en obra del hormigón				
	2.1 Hora de llegada de cada cuba	X	X	-	X



CEDEX

	Información	Pilotes entubados	Pilotes con lodos	Pilotes de barrena continua	Muros Pantalla
	2.2 Volumen vertido por cada cuba	X	X	-	X
	2.3 Retrasos entre cubas	X	X	-	X
	2.4 Cota superior del hormigón después del vertido de cada cuba	X	X	-	X
	2.5 Profundidad de la tubería Tremie después del vertido de cada cuba	X	X	-	X
	2.6 Volumen total vertido	X	X	X	X

X información necesaria

(X) información cuando corresponda

- no corresponde

En el caso de pilotes de pequeño diámetro, la información puede ser suministrada en forma de registros individuales agrupados para cada pilote o de resumen de grupos de pilotes del mismo tipo, contruidos siguiendo el mismo método.

La información puede ser suministrada en forma de registros individuales agrupados para cada pilote o de resumen de grupos de pilotes del mismo tipo, contruidos siguiendo el mismo método.

Antes del comienzo del pilotaje se deben decidir los detalles del registro y el formato de las medidas in situ.

Los registros de cualquier ensayo de integridad deben indicar el motivo del ensayo, el método de ensayo y el procedimiento, los resultados del ensayo y las conclusiones sobre la integridad del pilote.

En el Anejo C de la norma europea³ EN 1538 se muestra un ejemplo de registro de hormigonado para pantallas.

7.8 Bibliografía

1.- MINISTERIO DE FOMENTO (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.

2.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Bored piles. PRE-NORMA prEN 1536:2008*.

- 3.- CEN (2008). *Execution of special geotechnical work. Diaphragm walls. PRE-NORMA prEN 1538:2008*.
- 4.- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (2002). Cimentaciones por pilotes de hormigón armado moldeados "in situ". En *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*.
- 5.- MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS (2002). Pantallas continuas de hormigón armado moldeadas "in situ". En *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes*.
- 6.- Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-C. Seguridad estructural. Cimientos (2006).
- 7.- ACI (2006). Drilled piers. ACI 336.3R. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 3*. Detroit: Ed. American Concrete Institute.
- 8.- CEDEX (2006). *Recomendaciones para la ejecución e interpretación de ensayos no destructivos para el control de la integridad de pilotes y pantallas "in situ"*. Informe del Laboratorio de Geotecnia, CEDEX.
- 9.- MUZÁS LABAD, F. (1988) Ejecución de pilotes in situ. En CEDEX *Curso sobre pilotajes y cimentaciones profundas*. Madrid.
- 10.- CALAVERA RUIZ, J.; ALAEJOS GUTIÉRREZ, P.; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J.; GONZÁLEZ VALLE, E. y RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (2004) *Ejecución y control de estructuras de hormigón*. Ed. INTEMAC. Madrid.
- 11.- ACI (2006). Design, manufacture and installation of concrete piles. ACI 543R. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 6*. Detroit: Ed. American Concrete Institute.
- 12.- ASTM. (2008). "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. Standard C 39/C 39M-05". En *Annual book of ASTM Standards, Vol. 04.02*. Philadelphia: Ed. American Society for Testing and Materials.
- 13.- PRIETO TERCERO, L. Recomendaciones sobre las características del hormigón a colocar en pantallas y pilotes mediante el procedimiento "Tremie". Disponible en <http://www.ciccp.es/default.asp?indice=669&dem=6>. (Consulta: mayo de 2007)
- 14.- ACI (2006). Specification for the construction of drilled piers. ACI 336.1. En *ACI Manual of Concrete Practice. Part 3*. Detroit: Ed. American Concrete Institute.
- 15.- AENOR (2006). *Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras. NORMA UNE-EN 12350-1*. Madrid: Ed. AENOR.
- 16.- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (1999). *Drilled shafts: construction, procedures and design methods. Publication N° FHWA-IF-99-025*.
- 17.- BALDERAS MECA, J. y MAROTE RAMOS, G. Pruebas de carga estáticas-bidireccionales en pilotes de gran diámetro.
- 18.- OTEO MAZO, C. (1988) Coeficientes de seguridad y control de calidad. En CEDEX *Curso sobre pilotajes y cimentaciones profundas*. Madrid.
- 19.- AYUNTAMIENTO DE MADRID (1999). *Pliego de Condiciones Técnicas Generales*.



20.- Norma UNE EN 12504-1:01 “Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 1: Testigos. Extracción, examen y ensayos a compresión”

21.- FERNÁNDEZ CÁNOVAS, M. (1989). *Hormigón*. Madrid: E.T.S. Ingenieros de Caminos

8. HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

8.1 Introducción

Se define como hormigón autocompactante aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada. El hormigón autocompactante añade a las propiedades del hormigón convencional, en cualquiera de las clases resistentes, la propiedad de autocompactabilidad, descrita anteriormente¹.

Es decir, la característica básica reside en la posibilidad de ser colocado, alcanzando una alta compacidad, sin necesidad de aplicarle método alguno de compactación interna ni externa; por otra parte, este tipo de hormigón permite su desplazamiento horizontal sin que se produzca la segregación de sus componentes y fundamentalmente entre el mortero y el árido grueso, aspecto que limita las condiciones de vertido de los hormigones convencionales².

Las ventajas de este tipo de hormigón son la facilidad y agilidad de colocación, y la posibilidad de utilizar mayor densidad de armaduras, así como reducciones significativas en mano de obra. Además, desde el punto de vista de la prevención de riesgos laborales, este hormigón permite una reducción de la afección por ruido al medio ambiente y la eliminación del riesgo de padecer, por parte de los operarios que realizan las operaciones de compactación, de enfermedades laborales que dimanen del empleo de los vibradores. Como desventajas, se encuentran el escaso conocimiento de su tecnología de fabricación y colocación, y su coste más elevado en relación con los hormigones compactables convencionales².

Las condiciones de puesta en obra del hormigón de cimentaciones especiales impiden la posibilidad de ser compactado. Por este motivo, y tal como se ha descrito a lo largo de este documento, su dosificación está encaminada a conseguir mezclas fluidas y cohesivas que cierren con facilidad, por lo que existen ciertas similitudes con la tecnología del hormigón autocompactante, aunque este último además utiliza aditivos específicos.

En general, al igual que para el hormigón de cimentaciones especiales, las características exigibles al hormigón autocompactante son las mismas que las de un hormigón convencional, pero sin embargo sí existen algunas particularidades que son las que se van a detallar en este Capítulo. Para recabar un mayor nivel de detalle en la fabricación de hormigones autocompactantes, se recomienda la lectura de la Monografía ACHE "Hormigón autocompactante"⁹.

8.2 Materiales y dosificación

8.2.1 Aspectos generales

Los materiales componentes utilizados en los hormigones autocompactantes son los mismos que los empleados en los hormigones de compactación convencional, incluyendo además otros, más adelante especificados, que deben cumplir con los requisitos normativos de calidad que les



corresponda. Es de especial importancia que los hormigones autocompactantes se fabriquen con la mayor regularidad posible por lo que es muy importante la selección inicial y el control de los materiales así como la previa validación de cualquier dosificación¹.

El hormigón autocompactante se debe fabricar preferiblemente con los cementos que resulten adecuados para tal fin en función del tipo y cantidad de las adiciones que contengan, en su caso; o bien con cemento común tipo CEM I, las adiciones al hormigón reglamentadas y utilizando, cuando así se requiera, un "filler" inerte adecuado como árido de corrección de la granulometría de la arena en los diámetros más finos que pasan por el tamiz 0,063 mm¹.

De una u otra manera se debe conseguir una cantidad de finos (partículas que pasan por el tamiz 0,125 mm) suficiente para alcanzar la propiedad de autocompactabilidad. La cantidad total de finos menores de 0,125 mm aportada por el cemento, las adiciones al hormigón y los áridos, necesaria para fabricar hormigón autocompactante es del orden del 23%, en peso de la masa del hormigón, pudiendo determinarse, cuando sea necesario, con mayor precisión mediante los ensayos característicos correspondientes¹.

8.2.2 Cemento

Se deben utilizar cementos que cumplan la reglamentación específica vigente¹. Aunque aún no se comercializan es previsible la aparición en el mercado de cementos especiales de uso específico para la fabricación de hormigones autocompactantes, que incluyan adiciones complementarias para dotar al hormigón de la cantidad de partículas finas necesarias⁹. Este aspecto ya está previsto en la Instrucción EHE-08, ya que se indica que las cantidades mínimas a emplear de dichos cementos deben ser tales que, después de deducir la cantidad de adición complementaria que contengan, cumplan con las exigidas según el ambiente (ver en este documento el Capítulo 6. Durabilidad). Así, la cantidad de adición complementaria no se debe computar a los efectos de obtener la relación agua/cemento, ni la cantidad de cemento. Tanto el valor máximo de la relación agua/cemento, como la cantidad mínima de cemento deben cumplir con las especificaciones ya incluidas en el Capítulo 6. Durabilidad¹.

8.2.3 Áridos

El tamaño máximo de árido para el hormigón autocompactante se limita a 25 mm, siendo recomendable utilizar tamaños máximos comprendidos entre 12 mm y 20 mm, en función de la disposición de armaduras¹. Los tamaños máximos habituales⁹ están comprendidos entre 12 y 16 mm.

Los áridos redondeados proporcionan hormigones con mejores características de trabajabilidad, mientras los áridos procedentes de machaqueo en general proporcionan una mayor resistencia, dada la mayor adherencia con la pasta de sus caras fracturadas².

El filler es un material granular, cuya mayor parte pasa por el tamiz 0,063 mm y que se obtiene por trituración de diferentes tipos de roca, en particular caliza. Son fillers adecuados aquellos que provienen de los mismos materiales que los áridos que cumplen las prescripciones especificadas en la Instrucción EHE-08¹ (ver el Capítulo 3. Materiales componentes y su dosificación).

De acuerdo con la Norma UNE EN 12620 la granulometría de un filler se define en la tabla siguiente (Tabla 1)¹.

Tabla 1. Granulometría del filler

Tamiz de tamaño (mm)	Porcentaje que pasa en masa
2	100
0,125	85 a 100
0,063	70 a 100

Los ensayos iniciales de tipo, el control de producción en fábrica y la certificación de dicho control, en cuanto al filler se refiere, se establecen en la Norma UNE EN 12620¹.

Se recomienda, exclusivamente para el caso de los hormigones autocompactantes, que la cantidad resultante de sumar el contenido de partículas de árido fino que pasan por el tamiz UNE 0,063 y la adición caliza, en su caso, del cemento no sea mayor de 250 kg/m³ de hormigón autocompactante (para hormigones convencionales, este límite es de 175 kg/m³)¹.

Resulta necesario evaluar y tener muy controlada la humedad de los áridos por su influencia en el ajuste de la dosificación². En concreto, para el almacenamiento del filler se deben utilizar medios similares a los utilizados para el cemento, debiéndose utilizar recipientes o silos impermeables que lo protejan de la humedad y de la contaminación¹.

La mayor demanda de agua para obtener una consistencia determinada en hormigones con alto contenido de finos inertes (que pasan por el tamiz UNE 0,063), se debe compensar mediante el empleo de aditivos superplastificantes adecuados que garanticen el cumplimiento de las relaciones agua/cemento especificadas, asegurando de este modo la durabilidad¹.

8.2.4 Aditivos

En los hormigones autocompactantes, la incorporación de adiciones minerales finamente divididas o filler en general mejora sustancialmente la cohesión de la pasta de cemento, pero conduce a un aumento significativo de su viscosidad. Por eso su presencia requiere el empleo obligado en estos hormigones de aditivos superplastificantes, incluso en dosis más elevadas a las habituales. En la mayoría de los casos, los superplastificantes de nueva generación o policarboxilatos son los únicos capaces de satisfacer los elevados requerimientos de reducción de agua, consiguiendo la docilidad adecuada para colocar en obra este tipo de hormigones, ya que la capacidad reductora de agua de estos aditivos puede ser de hasta un 40%⁹. Los aditivos superplastificantes utilizados cumplirán la Norma UNE EN 934-2¹.

Adicionalmente, puede ser conveniente el uso de un aditivo modulador de la viscosidad que presenta las siguientes ventajas:

- minimiza los efectos de la variación del contenido de humedad, el contenido de finos o la distribución granulométrica, haciendo que el hormigón autocompactante sea menos sensible, en cuanto a la propiedad de autocompactabilidad se refiere, a pequeñas variaciones en la calidad de las materias primas y en sus proporciones¹.
- mejora sustancialmente la cohesión del hormigón, limitando la pérdida de agua por exudación y minimizando la tendencia a la segregación⁹.



- Los aditivos modificadores de viscosidad de nueva generación actúan fundamentalmente sobre la viscosidad plástica, permitiendo un mayor control de la reología de la pasta, lo que permite incluso minimizar el contenido de pasta necesario para proporcionar una óptima estabilidad en el hormigón y, por tanto, minimizando el contenido de finos en el hormigón autocompactante, llegando a contenidos de cemento + filler inferiores a 380 kg/m³ cuando los requerimientos mecánicos son menores⁹.

Los aditivos moduladores de viscosidad deben¹ cumplir los requisitos generales incluidos en la Tabla 1 de la Norma UNE EN 934-2, aunque esta norma no contempla requisitos específicos para ellos⁹. Su empleo se debe realizar después de conocer su compatibilidad con el cemento y las adiciones, comprobando un buen mantenimiento de las propiedades reológicas durante el tiempo previsto para la puesta en obra del hormigón autocompactante, así como las características mecánicas correspondientes mediante la realización de ensayos previos. Es importante destacar que una sobredosificación de este tipo de aditivos puede causar una pérdida importante de fluidez⁹.

8.2.5 Dosificación

Los componentes del hormigón autocompactante son los mismos que los del hormigón estructural convencional, aunque sus proporciones pueden variar respecto a las habituales, caracterizándose el hormigón autocompactante por un menor contenido de árido grueso, un mayor contenido de finos minerales y, en general, un menor tamaño máximo de árido¹.

Al dosificar un hormigón autocompactante, deben contemplarse las correspondientes exigencias relacionadas con el proyecto, a saber¹:

- Exigencias estructurales: espaciado entre barras de armadura, dimensiones del elemento, complejidad arquitectónica del encofrado, caras vistas, particularidades del proyecto que puedan influir en el escurrimiento del hormigón como variaciones de espesores, abultamientos, etc.
- Operativas: modalidad de llenado (bomba, cubilote, canaleta, etc.), velocidad y duración del llenado, características del encofrado, visibilidad del hormigón durante el llenado, distancia a la que ha de llegar el escurrimiento, altura de caída, accesibilidad del camión hormigonero, posicionamiento de los equipos de bombeo, etc.
- Ambientales: clima y temperatura ambiente en el momento del llenado, temperatura de los materiales, duración del transporte, eventuales situaciones críticas de tráfico, etc.
- De prestaciones: clase de exposición ambiental, resistencia característica, y demás requisitos de proyecto.

Como características generales¹, en la dosificación de un hormigón autocompactante se pueden citar:

- El contenido de cemento está en el rango de 250 a 500 kg/m³.
- Además, como ya se comentó anteriormente, la cantidad resultante de sumar el contenido de partículas de árido fino que pasan por el tamiz UNE 0,063 y la adición caliza, en su caso, del cemento no debe ser mayor de 250 kg/m³.

- El contenido total de los finos (tamaño de partícula $<0,125\text{mm}$), es decir, el cemento, las adiciones y fillers equivale aproximadamente al 23% en peso de la masa de hormigón. El valor habitual se encuentra en el intervalo de $450\text{-}600\text{ kg/m}^3$ ($180\text{ a }240\text{ litros/m}^3$).
- El volumen de pasta (agua, cemento, adiciones minerales activas, fillers y aditivos) se encuentra habitualmente por encima de los 350 litros/m^3 .

Las limitaciones a los contenidos de agua y de cemento quedan precisadas según las condiciones de exposición¹, al igual que en los hormigones convencionales.

Teniendo en cuenta que es la pasta la encargada de proporcionar la fluidez y aglutinar el árido, resulta lógico pensar en una granulometría continua y, más allá de las condiciones de espaciamiento entre barras, un tamaño máximo de árido no superior a los 25 mm. El volumen de árido grueso resulta menor en el hormigón autocompactante que en el hormigón de compactación convencional, generalmente no superando el 50% del total de áridos¹.

En el caso de utilizar más de un aditivo, es importante constatar la compatibilidad entre ellos¹, mediante la realización de ensayos previos. Generalmente, los aditivos se utilizan en una dosificación mayor que en el caso de los hormigones convencionales vibrados. Sin embargo, la sobredosificación de estos aditivos (superplastificantes y moduladores de la viscosidad) puede causar una pérdida importante de fluidez⁹.

Una vez alcanzados los requisitos de autocompactabilidad, es imprescindible que la dosificación sea probada en la situación de suministro industrial a la obra¹, mediante la realización de ensayos característicos.

Los métodos de dosificación de mezclas de hormigones autocompactantes son diferentes de los utilizados para hormigones convencionales, de modo que el ajuste de la dosificación exige la realización de ensayos con equipos de laboratorio muy especializados. Los métodos más difundidos se recogen brevemente a continuación⁹:

a) Método de la suspensión de sólidos del Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

El método se basa en el Modelo de Suspensión de Sólidos. El principio de este Modelo es que parte del agua del hormigón se emplea para rellenar los huecos entre el esqueleto granular (áridos más ligantes), y el resto para controlar la trabajabilidad. Reduciendo al mínimo las oquedades en el esqueleto granular, la trabajabilidad de una mezcla puede verse incrementada para el mismo contenido de agua. El Método predice índices de compacidad.

La principal desventaja de este método es que emplea un reómetro de hormigón de tipo BTRHEOM, equipo no siempre disponible.

b) Método de dosificación CBI (Swedish Cement and Concrete Institute).

Este método consta de tres fases. En la primera de ellas se determina el volumen mínimo de pasta. En la segunda fase se obtiene la composición de la pasta. Por último, en la tercera fase se comprueban las propiedades físicas del hormigón tanto en estado fresco como en estado endurecido.

El método exige la utilización de un viscosímetro de pastas.



CEDEX

c) Método racional de dosificación de Okamura y Ozawa.

El método fija desde un principio los contenidos de árido grueso y fino, con lo que la autocompactabilidad del hormigón fresco se alcanza ajustando sólo la relación agua/(cemento + filler) y el contenido en superplastificante.

En el diseño de mezclas de hormigón convencional, la relación agua/conglomerante es un factor de diseño desde el punto de vista de la obtención de la resistencia a la compresión requerida. En el hormigón autocompactante, esta relación se contempla más desde el punto de vista de la trabajabilidad que de la resistencia a compresión, ya que según este método, la relación agua/cemento es lo suficientemente baja como para obtener las resistencias especificadas.

d) Ejemplos de dosificaciones de hormigón autocompactante

En la Tabla 2 se recogen algunas dosificaciones publicadas en la literatura técnica correspondientes a hormigones autocompactantes con resistencias medias⁹.

Tabla 2. Dosificaciones de hormigones autocompactantes.

Mezclas (kg/m ³)/ otras propiedades	Autores						
	Domone y Chai (1996)	Sedran et al. (1996)	Kim et al. (1998)	Bartos y Grauers (1999)	Ambroise y Péra (2001)	Su et al. (2001)	Pacios et al. (2002)
Cemento	218	350	370	280	380	300	450
Cenizas volantes	125	-	159	-	-	148	-
Escorias	280	-	-	-	-	63	-
Fíller calcáreo	-	134	-	240	20	-	100
Arena	686	852	782	865	900	928	840
Árido grueso							
máximo 10 mm	-	363	-	-	-	-	-
máximo 16 mm	-	-	-	-	800	-	-
máximo 20 mm	785	571	820	750	-	718	770
Superplastificante	8,2	7,1	10,0	4,2	4,0	8,2	9,6
Agente de viscosidad	-	-	-	-	2,0	-	-
Oclisor de aire	0,8	-	-	-	-	-	-
Relación a/c	0,82	0,48	0,50	0,71	0,53	0,57	0,33

Mezclas (kg/m ³)/ otras propiedades	Autores						
	Domone y Chai (1996)	Sedran et al. (1996)	Kim et al. (1998)	Bartos y Grauers (1999)	Ambroise y Péra (2001)	Su et al. (2001)	Pacios et al. (2002)
Relación agua/finos	0,28	0,34	0,35	0,36	0,50	0,40	0,27
Resistencia a comp. 28 días (Mpa)	Dato no disponible	50	47	47*	48	41	50

* Resistencia obtenida en probetas cúbicas de 15 cm

8.3 Propiedades del hormigón

8.3.1 Hormigón fresco

Se define como robustez del hormigón autocompactante en estado fresco la capacidad del material de mantener sus características de autocompactabilidad. Una pérdida de fluidez y/o resistencia al bloqueo o a la segregación del hormigón autocompactante puede producir efectos inaceptables⁹.

Las fluctuaciones en la distribución granulométrica o en el contenido de agua pueden tener una influencia desfavorable sobre la resistencia a la segregación del hormigón autocompactante⁹, aspecto que se puede controlar con la utilización de un aditivo modulador de viscosidad.

Además los hormigones autocompactantes son más sensibles a las altas temperaturas (mayores a 30 °C), con las que pueden perder más rápidamente la propiedad de autocompactabilidad. A bajas temperaturas (alrededor de 10 °C), la fluidez inicial puede ser menor que a temperaturas intermedias, pero aparecen fenómenos de refluidificación (ganancia retardada de fluidez), aumentando el tiempo de mantenimiento de las características de autocompactabilidad⁹.

8.3.1.1 Docilidad del hormigón autocompactante

La docilidad del hormigón autocompactante se fundamenta en tres propiedades intrínsecas básicas¹:

- Fluidez o capacidad de fluir sin ayuda externa y llenar el encofrado.
- Resistencia al bloqueo o habilidad de pasar entre las barras de armadura.
- Estabilidad dinámica y estática, o resistencia a la segregación, que le permite alcanzar finalmente una distribución uniforme del árido en toda su masa.

Debido a los diferentes parámetros que influyen en la docilidad del hormigón autocompactante, ésta no puede ser caracterizada por los medios utilizados para el hormigón convencional. La

caracterización de la autocompactabilidad se realiza a través de métodos de ensayo específicos que permiten evaluar las prestaciones del material en términos¹:

- de fluidez, mediante ensayos de escurrimiento según UNE 83.361³ ó de ensayos de escurrimiento en embudo en V, según UNE 83.364⁶.
- de resistencia al bloqueo, mediante ensayos del escurrimiento con el anillo japonés, según UNE 83.362⁴ y mediante el método de la caja en L, según UNE 83.363⁵.
- y de resistencia a la segregación.

Si bien no existen ensayos normalizados para evaluar la resistencia a la segregación, la misma se puede apreciar a partir del comportamiento del material en los ensayos de escurrimiento y embudo en V. En el ensayo de escurrimiento debe observarse una distribución uniforme del árido grueso y ningún tipo de segregación o exudación en el perímetro de la "torta" final del ensayo¹.

8.3.1.2 Procedimientos de ensayo

Mediante el ensayo de escurrimiento³ se puede evaluar la capacidad para rellenar el encofrado de una pieza que no presente obstáculos al libre desplazamiento del hormigón, tales como armaduras, pudiendo dar complementariamente indicaciones sobre la capacidad del hormigón para no segregarse².

Los medios necesarios para su realización consisten en un tronco de cono de 100 mm de diámetro superior, 200 mm de diámetro inferior y 300 mm de altura (cono de Abrams), y una chapa metálica de al menos 700 x 700 mm y de espesor tal que garantice una rigidez adecuada (ver Figura 1). El cono se dispone sobre la chapa metálica y tras haber humedecido ligeramente tanto la chapa de base como la parte interior del cono, se introduce en él una muestra de hormigón tomada con procedimientos normales de muestreo de hormigón fresco. Tras enrasar la muestra con la cara superior del cono y sin haber procedido a compactar el hormigón introducido, se levanta el cono verticalmente a la vez que se mide el tiempo (T_{50}) que el hormigón tarda en llegar a una circunferencia de 500 mm de diámetro dibujada en la placa y se sitúa concéntricamente con el círculo de la base del cono. Por último, se mide el diámetro alcanzado por la masa de hormigón, diámetro de extensión del flujo (d_f), midiendo dos diámetros perpendiculares^{2,3}. Los requisitos exigidos a los parámetros medidos en el ensayo (T_{50} y d_f) se recogen en la Tabla 3.

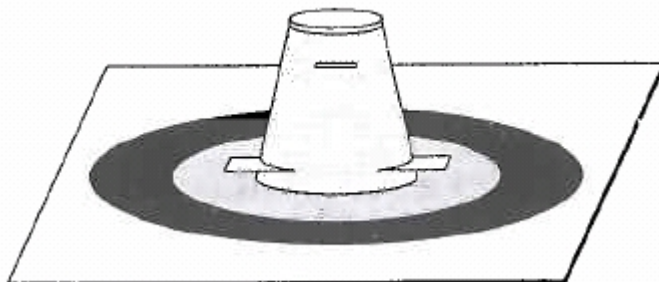


Figura 1.- Esquema del ensayo de escurrimiento².

El ensayo se considera³ correctamente ejecutado si la diferencia entre los dos diámetros es menor o igual a 50 mm.

Se observa detenidamente si se produce segregación, así como la posible exudación de la pasta en la zona perimetral, o la mayor concentración de árido grueso en la zona central de la masa de hormigón³.

El tiempo empleado en la toma de muestras, nivelación y enrasado del hormigón no debe superar los 3 minutos³.

El ensayo del embudo en V⁶ también se utiliza para evaluar la capacidad para rellenar el encofrado de una pieza. Se utiliza un embudo cuya geometría se indica en la Figura 2. Tras haber humedecido ligeramente la parte interior del embudo y comprobado que el sistema de cierre funciona correctamente, está asegurado y no deja escapar el hormigón, se introduce en él una muestra de hormigón tomada con procedimientos normales de muestreo de hormigón fresco. Se enrasa el hormigón vertido con la cara superior del cono sin compactar el hormigón introducido y tras dejar pasar 10 segundos, tras el llenado, se abre la compuerta inferior midiéndose el tiempo, T_V , que tarda el hormigón en salir del embudo, considerando este momento como el instante en el que el operador, observando el flujo desde la parte superior del embudo, vislumbra la luz a través de la boca inferior del mismo. El tiempo empleado en la toma de muestras, llenado del embudo y enrasado del hormigón no debe superar los 3 minutos⁶. El requisito exigido al parámetro medido en el ensayo (T_V) se recoge en la Tabla 3.

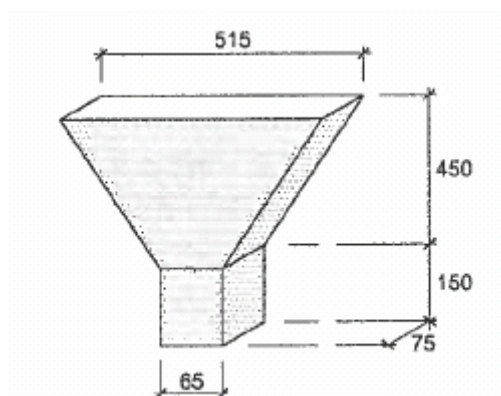
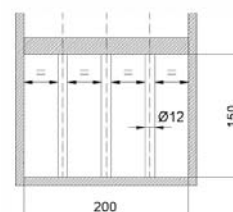
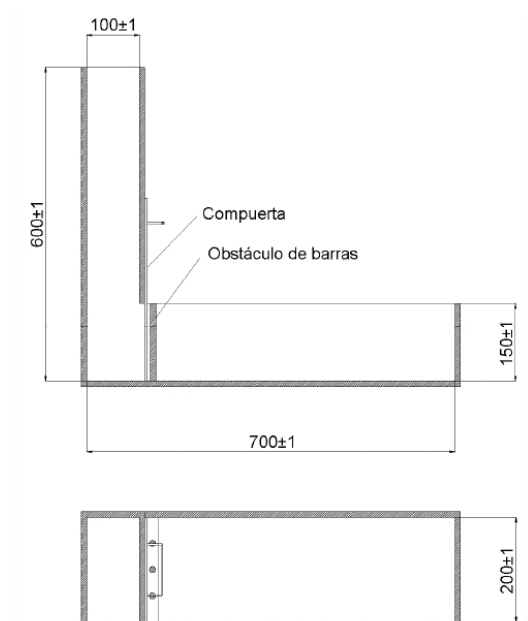


Figura 2.- Esquema del ensayo de embudo en V².

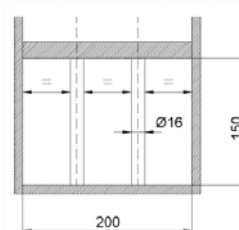
Acto seguido, sin limpiar ni mojar el embudo, nuevamente se puede repetir el ensayo (como indica⁹ la norma italiana UNI 11042) pero esperando tras el nuevo llenado un tiempo de 5 minutos antes de abrir la compuerta de salida, midiéndose el tiempo que tarda el hormigón en salir del embudo nuevamente. La diferencia de tiempo entre la segunda y la primera lectura no debe superar los 5 segundos, ya que una diferencia mayor estaría indicando que se está en presencia de una mezcla con baja resistencia a la segregación, pues el mayor tiempo en la segunda lectura estaría causado por la segregación del árido grueso, que provoca una restricción al flujo del material en la parte inferior del embudo^{2,9}.

El método de la caja en L sirve para evaluar la capacidad para rellenar el encofrado de una pieza cuando existen obstáculos al libre desplazamiento del hormigón, tales como los creados por la presencia de armaduras², mediante la determinación del coeficiente de bloqueo y el tiempo de escurrimiento al deslizar el hormigón dentro de un espacio confinado⁵.

Se utiliza un recipiente cuya geometría se indica en la Figura 3². Tras humedecer las caras interiores del recipiente, se introduce en él una muestra de hormigón tomada con procedimientos normales de muestreo de hormigón fresco. Se rellena de una sola vez la parte vertical de la caja con el hormigón introducido, se enrasa el hormigón con el borde superior y a continuación se abre rápidamente (esta operación debe realizarse de forma continua en un tiempo comprendido entre 2 y 3 segundos) la compuerta inferior midiéndose el tiempo que tarda el hormigón en llegar al extremo del molde horizontal⁵.



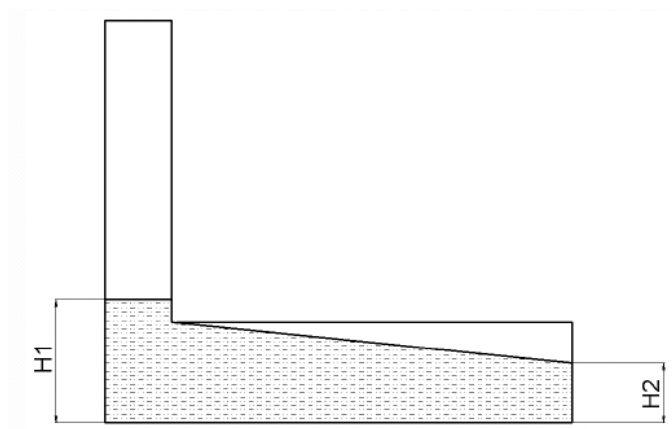
Disposición de barras para tamaño máximo de árido menor o igual a 20 mm



Disposición de barras para tamaño máximo de árido mayor que 20 mm

Figura 3.- Esquema del método de la caja en L⁵.

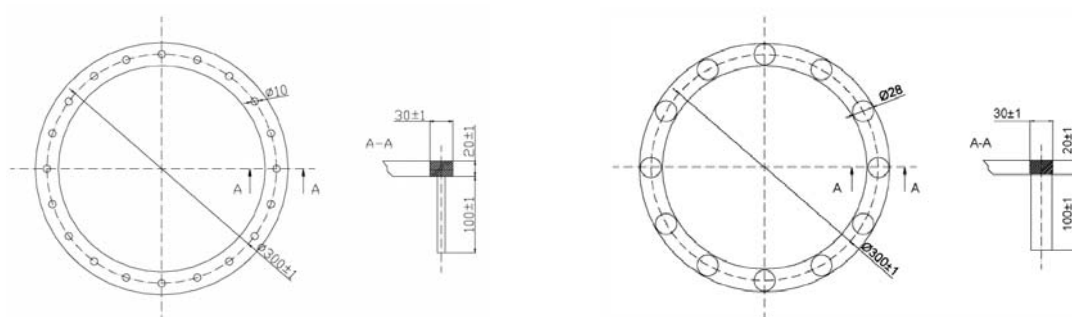
Una vez que cesa completamente el movimiento del hormigón, se mide la distancia vertical entre el borde superior del cuerpo vertical y la superficie del hormigón, por la parte interior de la pared paralela a la que contiene la compuerta, y en el centro de la misma. Restando esta distancia de la altura interior del cuerpo vertical, 600 mm, se obtiene la altura H1 según lo indicado en la Figura 4. A continuación, se mide la distancia vertical entre el borde superior del cuerpo horizontal y la superficie del hormigón, por la parte interior de la pared más lejana a la compuerta y en el centro de la misma. Restando esta distancia de la altura interior del cuerpo horizontal, 150 mm, se obtiene la altura H2, según lo indicado en la Figura 4⁵.

Figura 4.- Definición de las alturas H1 y H2⁵.

El tiempo empleado en la toma de muestras, relleno del molde vertical y enrasado del hormigón no debe superar los 3 minutos⁵.

El tiempo de escurrimiento, T_{60} , es el tiempo empleado, en segundos, para que la muestra alcance el extremo de la caja en L, situado a la distancia de 600 mm desde el extremo de la compuerta⁵. El coeficiente de bloqueo, C_{bL} , se calcula⁵ mediante la expresión: $C_{bL} = (H2/H1) \cdot 100$. El requisito exigido al parámetro medido en el ensayo (C_{bL}) se recoge en la Tabla 3.

Por último, el ensayo del escurrimiento con el anillo japonés, que especifica un método para caracterizar la fluidez del hormigón autocompactante en estado fresco, mediante la determinación del escurrimiento, el tiempo de escurrimiento y el coeficiente de bloqueo, medidos a partir de la ejecución del ensayo del cono de Abrams en el interior de un anillo de barras metálicas verticales. Las dimensiones de dicho anillo se muestran en la Figura 5, en función del tamaño máximo del árido⁴.



Anillo japonés para tamaño máximo de árido menor o igual a 20 mm

Anillo japonés para tamaño máximo de árido mayor que 20 mm

Figura 5.- Dimensiones del anillo utilizado en el ensayo⁴.

Tal y como se observa en la Figura 6, se utiliza como molde un tronco de cono de 100 mm de diámetro superior, 200 mm de diámetro inferior y 300 mm de altura (cono de Abrams), y una bandeja metálica de al menos 850 x 850 mm y de espesor tal que garantice una rigidez adecuada; el centro de la bandeja debe estar grabado con una cruz, cuyas líneas deben ser paralelas a los bordes de la bandeja, y con al menos tres círculos centrales concéntricos de 200 mm, 300 mm y 500 mm de diámetro. El cono y el anillo se disponen centrados sobre la bandeja metálica y tras haber humedecido ligeramente tanto la chapa de base como la parte interior del cono, se introduce en él una muestra de hormigón tomada con procedimientos normales de muestreo de hormigón fresco. Tras enrasar la muestra con el borde superior del molde, se eleva verticalmente el molde, tirando de las asas. Esta operación debe realizarse de forma continua en un tiempo comprendido entre 2 y 3 segundos. En el momento de levantar el molde, y de manera simultánea, se acciona el cronómetro y se detiene cuando la masa alcanza visualmente la marca de 500 mm de diámetro. Una vez que cesa completamente el movimiento del hormigón, se miden con la regla los diámetros finales alcanzados por éste en dos direcciones perpendiculares, d_{f1} y d_{f2} . El ensayo se considera correctamente ejecutado si la diferencia entre los dos diámetros es menor o igual a 50 mm⁴.

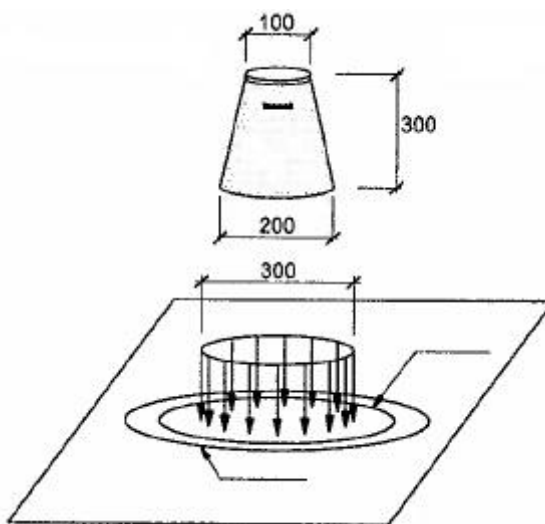


Figura 6.- Esquema del ensayo de escurrimiento con el anillo japonés².

Además, se mide la distancia vertical entre el borde superior del anillo y la superficie del hormigón en dos puntos de la circunferencia interna del anillo, situados aproximadamente en el punto medio del espacio entre dos barras. Uno de estos puntos debe estar situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia interna del anillo con el diámetro en el que se determinó d_{f1} . El otro punto debe estar situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia interna del anillo con el diámetro en el que se determinó d_{f2} . Restando estas distancias de la altura total del anillo, 120 mm, se obtiene la altura H1 según lo mostrado en la Figura 7, como el promedio de las dos determinaciones⁴.

Por último, se mide la distancia vertical entre el borde superior del anillo y la superficie del hormigón en dos puntos de la circunferencia externa del anillo, situados en el punto medio del espacio entre dos barras. A semejanza de lo indicado anteriormente, uno de estos puntos debe estar situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia externa del anillo con el diámetro en el que se determinó d_{f1} . El otro punto debe estar situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia externa del anillo con el diámetro en el que se determinó d_{f2} .

Restando estas distancias de la altura total del anillo, 120 mm, se obtiene la altura H2 según lo mostrado en la Figura 7, como el promedio de las dos determinaciones⁴.

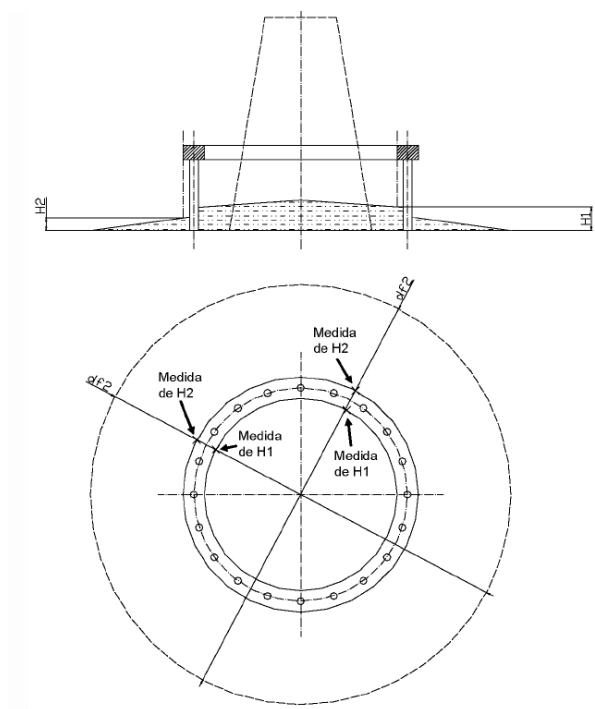


Figura 7.- Definición de las alturas H1 y H2⁴.

Se debe observar detenidamente si se produce segregación, así como la posible exudación de la pasta en la zona perimetral, o la mayor concentración de árido grueso en la zona central de la masa de hormigón. El tiempo empleado en la toma de muestras, relleno del molde vertical y enrasado del hormigón no debe superar los 3 minutos⁴.

El escurrimiento, d_{jf} , es el valor resultante de $(d_{f1} + d_{f2})/2$, redondeado a los 5 mm. El tiempo de escurrimiento, T_{J50} , es el tiempo empleado (en segundos) en alcanzar el diámetro de 500 mm. El coeficiente de bloqueo, C_{bE} , se calcula mediante la siguiente expresión⁴: $C_{bE} = (H2/H1) \cdot 100$. El requisito exigido al parámetro medido en el ensayo (d_{jf}) se recoge en la Tabla 3.

8.3.1.3 Requisitos de autocompactabilidad

La Tabla 3 muestra los rangos admisibles de los parámetros de autocompactabilidad que deben cumplirse, en cualquier caso, según los diferentes métodos de ensayo. Estos requisitos deben cumplirse simultáneamente para todos los ensayos especificados. El Autor del proyecto o, en su caso, la Dirección Facultativa puede definir un grado de autocompactabilidad más concreto mediante las categorías definidas en las Tablas 4, 5 y 6 del siguiente apartado, en función de las características de su obra¹.



CEDEX

Tabla 3. Requisitos generales para la autocompactabilidad

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrimiento	T_{50}	$T_{50} \leq 8 \text{ seg}$
	d_f	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$
Embudo en V	T_v	$4 \text{ seg} \leq T_v \leq 20 \text{ seg}$
Caja en L	C_{bL}	$0,75 \leq C_{bL} \leq 1,00$
Escurrimiento con anillo japonés	d_{Jf}	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$

Los hormigones autocompactantes deben mantener las características de autocompactabilidad durante un período de tiempo, denominado "tiempo abierto", que sea suficiente para su correcta puesta en obra en función de las exigencias operativas y ambientales del proyecto. Para la determinación del "tiempo abierto" se pueden utilizar los ensayos de caracterización indicados anteriormente, comparando el resultado de diversas repeticiones del mismo ensayo realizadas consecutivamente con la misma muestra¹.

8.3.1.4 Clases de autocompactabilidad

Se puede definir la autocompactabilidad mediante la combinación de las clases correspondientes al escurrimiento (AC-E), viscosidad (AC-V) y resistencia al bloqueo (AC-RB), de acuerdo con la siguiente expresión¹: $T-R/(AC-E+AC-V+AC-RB)/TM/A$ donde AC-E, AC-V y AC-RB, representan las clases correspondientes de acuerdo con las Tablas 4, 5 y 6.

Tabla 4: Clases de escurrimiento

Clase	Criterio, según UNE 83.361
AC-E1	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 650 \text{ mm}$
AC-E2	$650 \text{ mm} < d_f \leq 750 \text{ mm}$
AC-E3	$750 \text{ mm} < d_f \leq 850 \text{ mm} (*)$

Tabla 5: Clases de viscosidad

Clase	Criterio por el ensayo de escurrimiento, según UNE 83.361	Criterio alternativo por el ensayo del embudo en V, según UNE 83.364
AC-V1	$2'5 \text{ seg} < T_{50} \leq 8 \text{ seg}$	$10 \text{ seg} \leq T_v \leq 20 \text{ seg}$

Clase	Criterio por el ensayo de escurrimiento, según UNE 83.361	Criterio alternativo por el ensayo del embudo en V, según UNE 83.364
AC-V2	$2 \text{ seg} < T_{50} < 8 \text{ seg}$	$6 \text{ seg} \leq T_v \leq 10 \text{ seg}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2 \text{ seg}^{(*)}$	$4 \text{ seg} \leq T_v \leq 6 \text{ seg}^{(*)}$

Tabla 6: Clases de resistencia al bloqueo

Clase	Exigencia de la característica	Criterio por el ensayo del anillo J, según UNE 83.362 (*)	Criterio por el ensayo de caja en L, según UNE 83.363
AC-RB1	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea superior a 20 mm o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 80 y 100 mm	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$, con un anillo de 12 barras	$C_{bL} \geq 0,80$, con 2 barras
AC-RB2	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea igual o inferior a 20 mm o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 60 y 80 mm	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$, con un anillo de 20 barras	$C_{bL} \geq 0,80$, con 3 barras

(*) donde d_f representa el escurrimiento en el ensayo según UNE 83861 y d_{Jf} representa el escurrimiento en el ensayo del anillo J, según UNE 83362

En el caso de que el hormigón deba pasar por zonas con espesores inferiores a 60 mm, se debe analizar el comportamiento experimentalmente, diseñando elementos que permitan valorar la resistencia específica al bloqueo para el caso concreto¹.

En general, se considera la clase de autocompactabilidad AC-E1 como la más adecuada para la mayor parte de los elementos estructurales que se construyen habitualmente. En particular se recomienda su empleo en los siguientes casos¹:

- estructuras no muy fuertemente armadas,
- estructuras en las que el llenado de los encofrados es sencillo, el hormigón puede pasar por huecos amplios y los puntos de vertido del mismo no exige que se desplace horizontalmente largas distancias en el interior del encofrado.
- elementos estructurales en que la superficie no encofrada se separa ligeramente de la horizontal.

Por su parte, se recomienda la clase de autocompactabilidad AC-E3 en los siguientes casos¹:

- Estructuras muy fuertemente armadas.
- Estructuras en las que el llenado de los encofrados es muy difícil, el hormigón debe pasar por huecos muy pequeños y los puntos de vertido del mismo exigen que se desplace horizontalmente distancias muy largas en el interior del encofrado.
- Elementos estructurales horizontales en los que es muy importante conseguir la autonivelación del propio hormigón.
- Elementos estructurales muy altos, de gran esbeltez y muy fuertemente armados.

La Figura 8 recoge la clasificación propuesta por Walraven, donde las clases de autocompactabilidad se relacionan con el tipo de aplicación a la que va dirigida el material. En dicha Figura, SF es el equivalente al AC-E propuesto por la Instrucción EHE y VF/VS se corresponde con la nomenclatura española AC-V. Los rangos de la clasificación, establecidos en las recomendaciones europeas, se presentan en las Tablas 7 a 9.

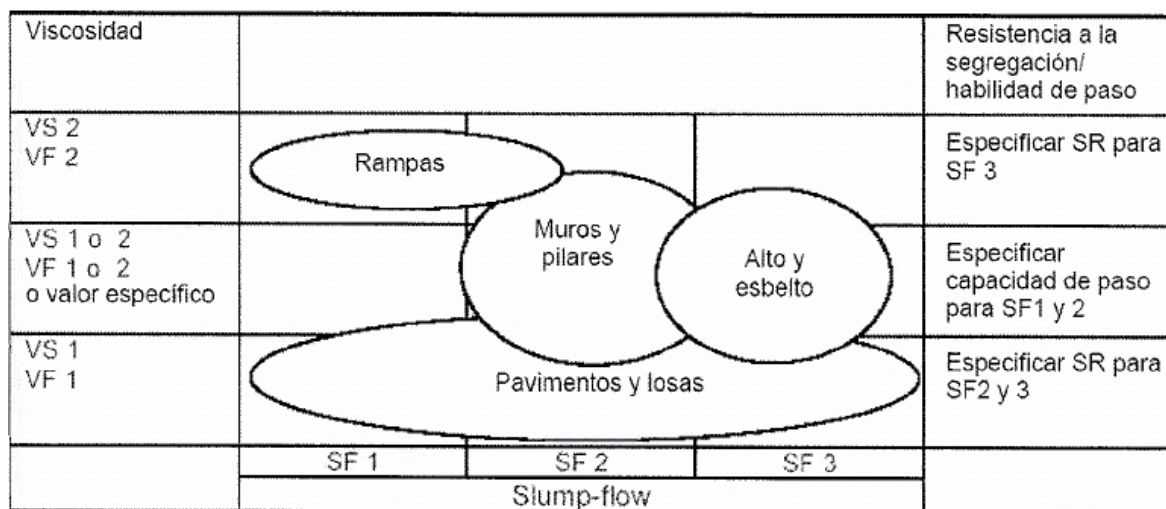


Figura 8. Clasificación por tipos de aplicación del hormigón autocompactante.

Tabla 7. Clasificaciones de hormigones autocompactantes.

Clase	d_r
SF1	550 a 650
SF2	660 a 750
SF3	760 a 850

Tabla 8. Clasificaciones de hormigones autocompactantes.

Clase	T_{50}
VS1	≤ 2
VS2	> 2

Tabla 9. Clasificaciones de hormigones autocompactantes.

Clase	T_v
VF1	≤ 8
VF2	9 - 25

8.3.2 Hormigón endurecido

Mientras que las propiedades en estado fresco del hormigón autocompactante difieren en gran medida de las del hormigón de compactación convencional, su comportamiento en términos de resistencias, durabilidad y demás prestaciones en estado endurecido puede considerarse similares a las de un hormigón convencional de igual relación a/c y elaborado con los mismos materiales componentes, con algunas particularidades que se expondrán seguidamente.

Las propiedades del hormigón autocompactante en estado endurecido, a las que se refieren los siguientes apartados, se deben evaluar con los mismos procedimientos de ensayo utilizados para el hormigón de compactación convencional¹.

En relación con su comportamiento a edad temprana, podrían producirse algunas variaciones en propiedades como la retracción y/o alteraciones en el tiempo de fraguado, que pueden también incidir en la evolución de resistencias, como consecuencia de que incorporan, en general, dosis mayores de finos y aditivos. En aplicaciones donde el módulo de elasticidad, la retracción por secado o la fluencia puedan ser factores críticos y el contenido en pasta o árido grueso varíe de forma sustancial sobre el normalmente utilizado, estas propiedades deben ser analizadas mediante ensayos específicos¹.

En general, las diferencias con el hormigón convencional son suficientemente pequeñas de forma que permiten utilizar para el hormigón autocompactante la formulación incluida en la Instrucción EHE-08 para hormigón convencional. En particular, se pueden utilizar las mismas longitudes de anclaje de las armaduras activas y pasivas, iguales criterios para especificar la resistencia mínima del hormigón y el mismo tratamiento de las juntas de construcción¹.

8.3.2.1 Resistencia a compresión y tracción

En el hormigón autocompactante la evolución de la resistencia a compresión con el tiempo puede considerarse equivalente a la de un hormigón convencional. Sin embargo, se debe tener en cuenta, en algunos casos, la posibilidad de un retraso en la ganancia de resistencia inicial debido a las dosis mayores de aditivos utilizados¹.



La tipificación de los hormigones autocompactantes es análoga a la de los hormigones de compactación convencional, sin más que utilizar como indicativo C de la consistencia, las siglas AC, de acuerdo con la siguiente expresión¹: T-R/AC/TM/A (como, por ejemplo, HA-35/AC/20/IIIa).

Para la resistencia a tracción pueden hacerse las mismas consideraciones que para la resistencia a compresión. Por lo tanto, pueden aplicarse las relaciones entre ambas resistencias propuestas en la Instrucción EHE-08 para hormigón convencional (ver el Capítulo 5) para la resistencia a tracción y a flexotracción¹.

8.3.2.2 Módulo de elasticidad

Debido a que los hormigones autocompactantes contienen un mayor volumen de pasta que el hormigón de compactación convencional, y teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad de la pasta es menor que el de los áridos, se podría prever un módulo de deformación ligeramente menor (entre un 7% y un 15%) para el caso del hormigón autocompactante^{1,9}.

A falta de datos experimentales, puede calcularse el módulo de deformación utilizando la formulación de la Instrucción EHE (recogida en el Capítulo 5) para el hormigón de compactación convencional. Cuando se requiera un conocimiento detallado del valor del módulo de deformación longitudinal, como por ejemplo en algunas estructuras con un proceso de construcción evolutivo en que el control de las deformaciones resulte crítico, se pueden hacer determinaciones experimentales de dicho valor, al igual que se hace cuando se utiliza hormigón de compactación convencional¹.

8.3.2.3 Retracción

En general, es de aplicación la formulación indicada para hormigón convencional (ver el Capítulo 5). No obstante, debido a la composición del hormigón autocompactante, puede presentarse una mayor retracción (plástica, endógena y de secado), que debe considerarse como se indica a continuación.

Debido a que el hormigón autocompactante tiene una mayor cantidad de finos en su composición y una alta resistencia frente a la segregación, el material prácticamente no exuda agua durante la puesta en obra. Si bien teóricamente este aspecto resulta positivo, en la práctica el efecto puede resultar inverso, ya que muchas veces es el agua de exudación la que compensa el agua que se evapora en estado fresco y, consecuentemente, evita la fisuración por retracción plástica¹.

En el hormigón autocompactante, puede darse una combinación de factores que podrían conducir a una significativa retracción endógena: un contenido de cemento superior, el uso de un cemento más fino (conducentes a un mayor calor de hidratación), la mayor cantidad de material fino en general y las bajas relaciones agua/finos.

Si la retracción endógena del material es un parámetro significativo para la función de la estructura, debe ser evaluada para la mezcla en cuestión durante un periodo de tiempo no menor a 3 meses a través de ensayos de laboratorio sobre probetas selladas inmediatamente después del desmolde¹.

Asimismo, si la retracción por secado del material es un parámetro significativo para la función de la estructura, debe ser evaluada para la mezcla en cuestión durante un periodo de tiempo no menor a 6 meses a través de ensayos de laboratorio sobre probetas expuestas a una atmósfera controlada¹.

8.3.2.4 Fluencia

El comportamiento en fluencia del hormigón autocompactante puede considerarse equivalente al de un hormigón de compactación convencional de igual relación a/c, por lo que en general puede utilizarse la formulación de la Instrucción EHE para hormigón convencional. En ocasiones, para el mismo nivel resistente podrían producirse deformaciones ligeramente mayores, aunque si se permite el secado al aire esta diferencia puede desaparecer a causa del mayor refinamiento de la estructura de poros del hormigón autocompactante¹.

En aplicaciones donde la fluencia pueda ser un factor crítico, esta propiedad debe ser tomada en cuenta durante el proceso de dosificación y verificada mediante ensayos específicos de laboratorio sobre probetas expuestas a una atmósfera controlada¹.

8.3.2.5 Calor de hidratación

De manera equivalente a lo que sucede con el hormigón de compactación convencional, un alto contenido de cemento conducirá a un mayor calor de hidratación, una consecuente dilatación y una posterior retracción térmica, lo cual en elementos de mediana o gran masa podría resultar crítico de cara a la fisuración. Se deben emplear las mismas precauciones que para el hormigón de compactación convencional¹.

8.3.2.6 Adherencia a las armaduras

En cuanto a los criterios específicos para el anclaje y empalme de las armaduras, hay que tener en cuenta que, en términos medios, la adherencia entre las barras de armadura y el hormigón resulta superior para el hormigón autocompactante que para un hormigón convencional comparable. Por lo tanto, como criterio conservador puede seguir considerándose la tensión de adherencia normalizada¹.

8.4 Ejecución

En el proceso de fabricación de hormigones autocompactantes se deben cuidar, especialmente, los siguientes aspectos¹:

- El hormigón autocompactante debe fabricarse en central, que puede pertenecer o no a la obra.
- Debe determinarse con precisión la humedad de los áridos durante su almacenamiento, y previamente a la mezcla y amasado de los componentes del hormigón, para evitar variaciones no previstas que afecten a la docilidad del hormigón.



- La incorporación de aditivos puede realizarse en planta o en obra. Sin embargo, por las especiales características de este hormigón, es conveniente la combinación de ambas situaciones, bajo el control del fabricante del hormigón.
- El transporte se debe efectuar mediante amasadora móvil o camión hormigonera.

El almacenamiento del cemento debe hacerse en silos o recipientes estancos que garanticen su aislamiento de la humedad. El efecto de un cemento con demasiado tiempo de almacenamiento puede ser más notable en hormigones autocompactantes que en los de compactación convencional. Esto es debido a que el hormigón autocompactante suele llevar mayor cantidad de cemento y la interacción aditivo-cemento es fundamental para lograr sus propiedades autocompactantes⁹.

El orden de llenado de la amasadora recomendable es áridos, filler, cemento, agua de báscula, aditivos y agua de afino si es necesaria. Algunos hormigones tienden a formar grumos, generalmente de componentes finos sin mezclar; este problema se puede evitar respetando este orden de dosificación, ya que el árido grueso por efecto yunque ayuda a disolver los grumos⁹.

En general, los tiempos de amasado para la elaboración del hormigón deben ser algo mayores que en el caso de los hormigones convencionales^{2,9}, dado el mayor contenido de finos y debido a la necesidad de dar el tiempo necesario al superplastificante para su dispersión y actuación. Se recomienda que este tipo de hormigones se fabrique en plantas con amasadora, ya que se facilita la obtención de hormigones más homogéneos, y normalmente con mejor amasado que los fabricados con centrales dosificadoras⁹.

Un síntoma de falta de mezclado es la aparición de grumos de cemento, filler y arena sin humedecer, de modo similar a lo que puede ocurrir en los equipos de amasado para aplicaciones in situ⁹.

En cuanto al transporte del hormigón, hay que evitar que los camiones hagan recorridos por terreno abrupto o con baches, ya que esto puede favorecer la segregación del hormigón⁹.

Cuando se utilice hormigón autocompactante se debe tener en cuenta para el cálculo de cimbras, encofrados y moldes, que la ley de presión estática, ejercida por aquél, puede llegar a ser de tipo hidrostático¹. Además, los encofrados deben ser no absorbentes².

Se deben prever orificios que permitan el drenaje del aire que se puede acumular en algún punto del elemento a hormigonar, originando bolsas de aire comprimido por la presión del hormigón en el interior de la pieza hormigonada⁹.

Cuando el hormigón autocompactante se coloque mediante bombeo se debe tener en cuenta el incremento de presión correspondiente¹. La presión que actúa sobre cada punto del encofrado es, como mínimo, la hidrostática originada por un líquido con densidad igual a la del hormigón⁹.

Si bien el hormigón autocompactante no aumenta las pérdidas de lechada por las juntas del encofrado (a pesar de su fluidez, debido a que no segrega agua ni lechada, tiene menos tendencia a estas pérdidas⁹), es deseable asegurar una buena estanqueidad del mismo, como cuando se utiliza hormigón de compactación convencional^{1,9}.

Cuando se utiliza hormigón autocompactante se recomienda una distancia máxima de colocación de 10 m desde el punto en el que se vierte el hormigón¹ y una altura máxima de vertido² de 5 m. Sin embargo, el mejor acabado de las superficies vistas y la menor oclusión de aire se obtienen cuando el hormigón se deposita lo más cerca posible del fondo del encofrado,

por lo que, cuando se bombea, es recomendable iniciar el hormigonado situando la manguera tan cerca como sea posible del mismo¹.

Debido a la condición de autocompactabilidad no es necesario, en general, someter al hormigón a un proceso de compactación¹.

En tiempo caluroso deben extremarse las medidas para disminuir el riesgo de desecación en las diferentes etapas de fabricación, transporte, puesta en obra y curado, en las primeras horas¹. La gran cantidad de pasta que contienen generalmente y la baja relación agua/finos hacen a los hormigones autocompactantes muy sensibles a la pérdida de agua, que puede producir la pérdida de sus propiedades autocompactantes antes de su colocación y posteriormente la desecación superficial y la aparición de fisuras de retracción plástica, ya que, debido a la prácticamente nula exudación que presentan estos hormigones, no se genera la película de agua superficial típica de los hormigones convencionales, que ayuda a su auto-curado a edades muy tempranas⁹.

Cabe recomendar que se realicen estudios específicos con los aditivos o combinaciones de aditivos y ligantes a utilizar cuando las condiciones ambientales prevean temperaturas superiores a los 30 °C. A su vez, en tiempo caluroso cabe alertar sobre las variaciones de las propiedades del hormigón autocompactante en el tiempo, recomendando que se tengan en cuenta con buen margen los tiempos de transporte y colocación⁹.

Finalmente, en cuanto al curado, debido a las bajas relaciones agua/ligante utilizadas y a la ausencia de exudación, es conveniente realizar un buen curado que evite la desecación superficial y los efectos de la retracción plástica a la que el hormigón autocompactante puede resultar más vulnerable que el hormigón de compactación convencional, especialmente en elementos con alta relación superficie/volumen¹.

8.5 Durabilidad

Como consecuencia de la ausencia de vibración y al uso habitual de adiciones y fillers en el hormigón autocompactante, se suele obtener una interfase pasta-árido más densa que en los hormigones convencionales. Como consecuencia de ello, junto con la mayor compacidad general de la estructura granular, suele obtenerse una reducción en la velocidad de ingreso de la mayoría de los agentes agresivos¹.

La ausencia de vibración redunda, a su vez, en una capa exterior del hormigón de recubrimiento de superior densidad y, por tanto, menos permeable. No obstante, en cualquier caso deben respetarse los requisitos de máxima relación a/c y mínimo contenido de cemento en función de la clase de exposición¹.

Es preciso analizar la posible formación de thaumasita en los hormigones autocompactantes con elevado contenido de filler calizo, expuestos al agua de mar o a condiciones de elevada humedad y presencia de iones sulfato⁹.

El comportamiento del hormigón autocompactante frente a ciclos de congelamiento y deshielo puede considerarse equivalente al del hormigón de compactación convencional, debiendo considerarse las mismas precauciones y especificaciones¹.

En cuanto a la resistencia al fuego del hormigón autocompactante, debido a su microestructura más densa, el riesgo de desconchamiento explosivo podría resultar mayor para este material. Sin embargo, para hormigones autocompactantes en los que la adición de humo de sílice no sea



significativa, el planteamiento de la resistencia al fuego puede ser el mismo que el incluido en el Anejo 7 de la Instrucción EHE para el hormigón convencional de igual clase resistente, o para los hormigones de alta resistencia cuando dicha adición sea relevante¹.

8.5.1 Control de calidad

En general, son aplicables los principios establecidos en la Instrucción EHE-08 para hormigón convencional¹ (ver Capítulo 7).

Las condiciones de aceptación del hormigón autocompactante, se establecen en función del resultado de los ensayos de resistencia a compresión y de docilidad. A diferencia de los hormigones de compactación convencional, la docilidad del hormigón autocompactante no se mide mediante la consistencia, sino mediante la propiedad de autocompactabilidad, cuyas especificaciones se recogían en los apartados 3.1.3 y 3.1.4¹.

Cuando se utilice hormigón autocompactante, el control de las propiedades de autocompactabilidad se debe realizar en todos y cada uno de los camiones hormigonera o unidades de suministro, mediante un único ensayo de escurrimiento, según UNE 83361, por cada camión hormigonera o unidad de suministro, si se trata de hormigón en masa o armado, con armadura que no presente dificultades al paso del hormigón, o mediante un único ensayo de escurrimiento y otro con anillo J, según UNE 83362, si se trata de un hormigón densamente armado¹.

El resto de los ensayos para la caracterización de la autocompactabilidad, recogidos en el apartado 3.2., métodos del embudo en V y caja en L, según UNE 83364 y 83363, respectivamente, se deben realizar únicamente en los ensayos previos y en los característicos en la central de producción del hormigón, para ajustar la dosificación¹.

Los ensayos de resistencia del hormigón se deben realizar del mismo modo que en hormigón de compactación convencional, pero con la modificación a la UNE EN 12390-2 de que las probetas se deben fabricar por vertido simple, de una sola vez y sin ningún tipo de compactación. Únicamente se admite el acabado superficial con llana¹.

Se considera recomendable, en cualquier caso, la realización sistemática de los ensayos previos para optimizar la dosificación a utilizar en los hormigones autocompactantes, prestando especial atención a la característica de autocompactabilidad¹.

En cuanto a los ensayos característicos de resistencia, son aplicables los principios establecidos en el anejo 22 de la Instrucción EHE-08 (ver Capítulo 7)¹.

8.6 Aplicaciones de cimentaciones especiales

La tecnología del hormigón autocompactante, fue desarrollada a finales de los años 80 en Japón, y aplicada por primera vez en los dos anclajes del puente colgante Akashi-Kaikyo colocando 290.000 m³ de hormigón, lo cual permitió acortar el plazo de ejecución de la obra. Desde entonces, esta tecnología, aplicada en muchos casos específicamente para obtener hormigones de alta resistencia, se ha utilizado en proyectos de muros pantalla en Japón, con las siguientes ventajas:

- El hormigón autocompactante, debido a su excelente fluidez y capacidad de llenado, es una buena alternativa cuando el material debe recorrer grandes distancias horizontales sin segregarse.
- El hormigón autocompactante presenta una gran capacidad para rellenar los huecos en pantallas con una gran densidad de armado o con jaulas de formas irregulares.
- En pantallas de gran volumen, la fabricación de hormigón autocompactante de alta resistencia con cementos con adiciones de bajo calor de hidratación ha permitido reducir el espesor y el riesgo de fisuración térmica de los elementos, resultando un hormigón con una gran impermeabilidad y de menor coste.
- En pantallas cilíndricas sometidas a grandes esfuerzos de compresión axial, la utilización de hormigón autocompactante de alta resistencia ha permitido reducir el espesor de las estructuras con un ahorro considerable del costo de ejecución.
- En pantallas en las que se requiere una gran rigidez, por ejemplo para minimizar el impacto de las excavaciones en las cimentaciones de estructuras vecinas, los hormigones autocompactantes de alta resistencia ofrecen una gran ventaja competitiva.

Hay que destacar que en estas aplicaciones se llevaba a cabo una exhaustiva fase previa de ensayos de laboratorio para comprobar el efecto de todas las variables en la dosificación final.

También es recomendable una vez deducida una dosificación teórica, comprobar la estabilidad de las propiedades del hormigón mediante ensayos de laboratorio que asuman las posibles variaciones en el contenido de agua, de adiciones, en la temperatura del hormigón y en la calidad de los áridos y cementos empleados durante el proceso de producción del hormigón, dado que al amasar grandes volúmenes de hormigón es posible obtener desviaciones locales respecto a la dosificación teórica⁷.

A continuación se resumen las dosificaciones empleadas y los datos más relevantes en diferentes obras subterráneas⁸.

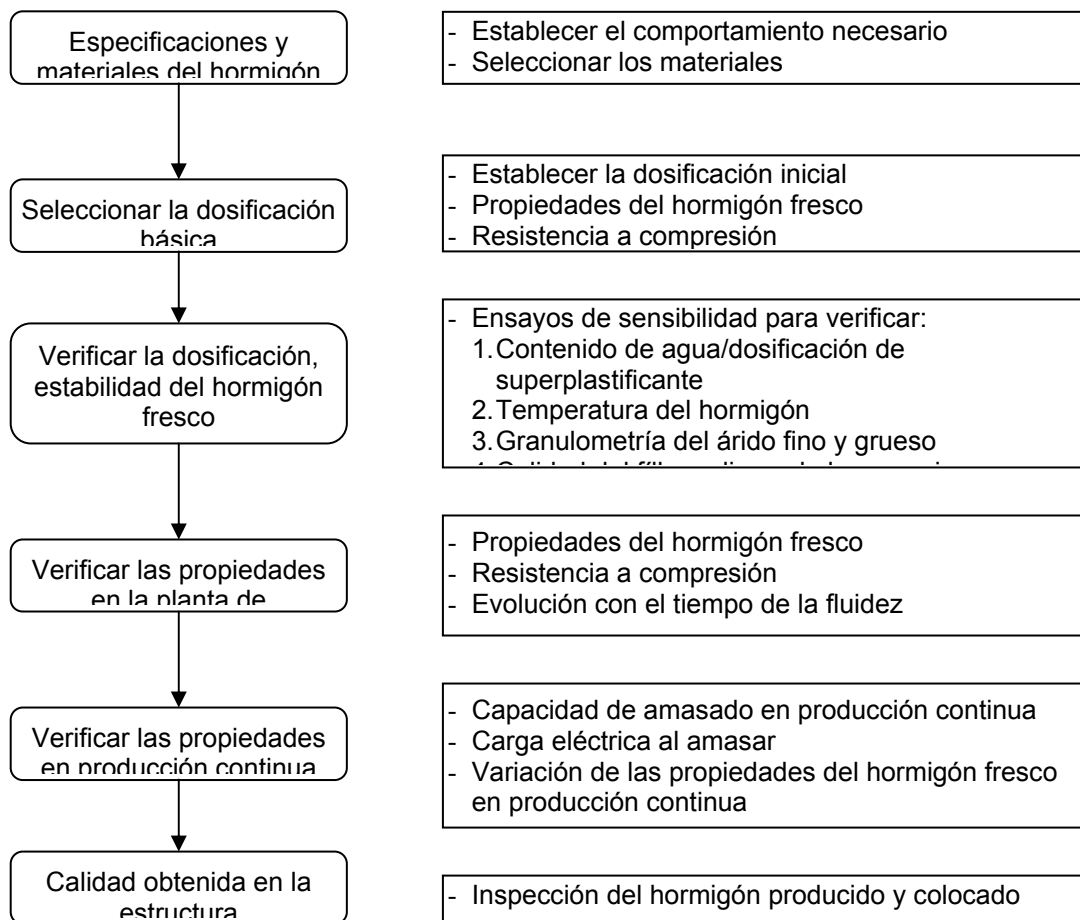
a) Tanque subterráneo construido con muros pantalla para Korea Gas Corporation⁷. El tanque en cuestión se diseñó con un diámetro interior de 78,58 m y una capacidad de almacenamiento de 200.000 m³, lo que lo convierte en uno de los mayores del mundo. El muro pantalla cilíndrico, que se construyó antes de la excavación del espacio reservado para el almacenamiento, tenía 1,7 m de espesor y 75 m de profundidad, resultando un volumen total de muro pantalla de 32.800 m³.

El espesor de los muros pantalla (empleados como muros de sostenimiento temporal del terreno) se redujo gracias al empleo de hormigón autocompactante de alta resistencia, lo que supuso una mayor eficiencia económica debido a las prestaciones del material: gran impermeabilidad, elevada resistencia y garantía de calidad. Además, las pantallas de hormigón actuaron como elementos impermeabilizantes una vez completada la construcción del tanque, lo que supuso una disminución de la subpresión sobre la losa del fondo del tanque y permitió reducir su espesor.

El proceso de investigación y ajuste de la dosificación del hormigón autocompactante de alta resistencia a esta estructura siguió los siguientes pasos:



CEDEX



Como ensayos previos para determinar la sensibilidad a las variaciones de dosificación, se comprobaron específicamente los siguientes aspectos:

- Una variación del contenido de agua de $\pm 10 \text{ kg/m}^3$ no producía efectos apreciables sobre la consistencia, cumpliendo sobradamente los requisitos de autocompactabilidad.
- La fluidez apenas se veía afectada por cambios en la granulometría del árido fino y grueso, en la relación cemento-escoria o en la superficie específica del filler calizo.
- El descenso de la viscosidad cuando la temperatura del hormigón era de 30°C era marginal, sin que estos cambios de temperatura afectaran apreciablemente a las propiedades del hormigón.

La resistencia en el ajuste de dosificación se fijó en 52 N/mm^2 para alcanzar una resistencia de proyecto de 40 N/mm^2 (a los 91 días) considerando un coeficiente de reducción de resistencia de 0,93 por hormigonado bajo el agua y un factor de seguridad de 1,2. Estos factores se han adoptado teniendo en cuenta experiencias de campo similares en muros pantalla de Japón construidos con hormigón autocompactante.

En conclusión, la dosificación finalmente adoptada fue la siguiente⁷:

Resistencia a caract. (91 d) N/mm ²	Tamaño máx. del árido grueso (mm)	Nivel de autoc.	d _f (mm)	T ₅₀ (s)	T _v (s)	Retardo de fraguado (horas)	Aire ocluido (%)	Cemento-filler calizo
40	20	2	650±50	4 - 10	10 - 20	1,5	4,0±1,0	438:70

Relación agua/mat. Cementantes (%)	Volumen de árido grueso (m ³ / m ³)	Peso (kg/m ³)						
		agua	cemento	adiciones	Árido fino	Árido grueso	Aditivo superplast.	Aditivo modulador viscosidad
41,1	0,30	180	438	70	809	792	11,7	0,245

El cemento era tipo pórtland con escorias (Tipo B). El aditivo superplastificante y el aireante era de tipo base de melamina, al que se añadió un aditivo para mantener la fluidez de tipo éter policarboxílico modificado; como aditivo modulador de la viscosidad, se empleó uno de tipo éter celulosa (HPMC), combinado con un polisacárido.

La central de hormigonado constaba de dos amasadoras biaxiales de tipo horizontal, con una capacidad media de 3,5 m³. Para una producción continua de hormigón de calidad homogénea bastaba emplear 20 segundos en cargar la amasadora con los materiales y otros 75 segundos en amasar.

En cada jornada de trabajo (de 14,5 a 17 horas de duración) se colocaban 1.000 m³ de hormigón. Se consiguieron calidades del hormigón constantes (en cuanto a fluidez y resistencia a la segregación) mediante el establecimiento de un sistema de suministro continuo de áridos y materiales cementicios en grandes cantidades, enormes silos de árido que permitían el suministro de árido con una humedad superficial constante y el suministro continuo de un único tipo de hormigón procedente de una planta escogida.

Se obtuvo un muro pantalla de buena calidad, aunque se observaron algunas fisuras debidas a tensiones térmicas. Además se extrajeron testigos horizontales del muro pantalla; la resistencia obtenida en estos testigos era igual o ligeramente superior a la de las probetas tomadas durante la ejecución y curadas en condiciones normalizadas.

b) Muro pantalla de sección irregular en el túnel Nishi-Shinjuku⁸. El proyecto se diseñó con un hormigón autocompactante de bajo calor de hidratación debido a la gran distancia horizontal (4,7 m) desde el punto de vertido que debía recorrer el hormigón sin segregarse. La dosificación adoptada fue la siguiente:



CEDEX

Resistencia caract. (28 d) N/mm ²	Tamaño máx. del árido grueso (mm)	Nivel de autocompact.	d _f (mm)	T ₅₀ (segundos)	Aire ocluido (%)	Cemento-filler calizo
30	20	2	650 ± 50	5 - 10	4,5 ± 1,5	350:150

Relación agua/mat. Cementantes (%)	Volumen de árido grueso (m ³ / m ³)	Peso (kg/m ³)						
		agua	cemento	adiciones	Árido fino	Árido grueso	Aditivo superplast.	Aditivo modulador viscosidad
47,1	0,310	165	350	150	819	837	9,0	0,5

Se utilizó un cemento de escorias y como adición filler calizo. El hormigón mantenía su fluidez después del período de transporte, que llegó a ser hasta de 2,5 horas desde el centro de Tokio hasta la obra. Se colocaron 670 m³ de hormigón en 10 horas utilizando tres amasadoras de 3 m³.

c) Cimentación rígida de un muro pantalla subterráneo en el Puente Rifu en Japón⁸. Para alcanzar la rigidez necesaria en el proyecto, la densidad de armado era muy elevada (superior a 350 kg/m³); como además se utilizó un acero de alta resistencia, era necesario asegurar una adecuada transmisión de tensiones en las juntas. Por lo tanto, se proyectó utilizar un hormigón autocompactante de gran capacidad de relleno de huecos. La dosificación de dicho hormigón se muestra en las siguientes tablas:

Resistencia caract. (91 d) N/mm ²	Tamaño máx. del árido grueso (mm)	Nivel de autocompact.	d _f (mm)	T ₅₀ (segundos)	Aire ocluido (%)	Cemento-ceniza vol.
24	20	1	650 ± 50	5 – 12	4,5 ± 1,5	80:20

Relación agua/mat. Cementantes (%)	Volumen de árido grueso (m ³ / m ³)	Peso (kg/m ³)						
		agua	cemento	adiciones	Árido fino	Árido grueso	Aditivo superplast.	Aditivo modulador viscosidad
32,4	0,290	162	400	100	839	844	11,0	0,5

Se seleccionó el nivel de autocompactabilidad 1 por la alta congestión de armaduras.

Antes del comienzo de los trabajos, se construyó un tanque de agua de prueba, en el que se comparó la capacidad de relleno de huecos de un hormigón sumergido con un cono de 21 cm y de un hormigón autocompactante. Durante el hormigonado, el hormigón sumergido normal formaba pendientes al fluir por la armadura, mientras que el hormigón autocompactante rellenó el tanque manteniendo prácticamente el nivel horizontal. Una vez endurecido, se extrajeron testigos para comparar sus resistencias con las de muestras curadas en condiciones normalizadas. Mientras la resistencia de los testigos de hormigón sumergido se había reducido al 70-80% respecto al valor de las probetas de curado estándar, en el hormigón autocompactante no se observó ninguna pérdida de resistencia destacable.

d) Pilotes con armadura flexible en la estación Akihabara⁸. El proyecto contaba con la ejecución de pilotes singulares con armadura axial y de cortante basada en cordones de acero de alta resistencia; el hormigón tenía una resistencia de proyecto de 42 N/mm² y los pilotes alcanzaban una profundidad de 27 m. Se utilizó un hormigón autocompactante con las siguientes características:

Resistencia caract. (91 d) N/mm ²	Tamaño máx. del árido grueso (mm)	Nivel de autocompact.	d _f (mm)	T ₅₀ (segundos)	Aire ocluido (%)	Cemento de bajo calor de hidratación-escorias-cenizas
42	20	2	650 ± 50	5 – 12	3,0 ± 1,5	40:50:10

Relación agua/mat. Cementantes (%)	Volumen de árido grueso (m ³ / m ³)	Peso (kg/m ³)						
		agua	cemento	adiciones	Árido fino	Árido grueso	Aditivo superplast.	Aditivo modulador viscosidad
32,0	0,310	160	500	-	857	840	11,0	0,5

e) Pantalla de impermeabilización de la presa de materiales sueltos Chubetsu Dam⁸. La pantalla de impermeabilización tenía una altura máxima de 22 m y una longitud de 232 m (aproximadamente 3.600 m³). Para garantizar la adecuada impermeabilización, se utilizó un hormigón autocompactante de bajo calor de hidratación, capaz de densificar la microestructura del hormigón y controlar la fisuración térmica (mediante la sustitución parcial del cemento por filler calizo). Las características del hormigón autocompactante fueron:

Resistencia caract. (91 d) N/mm ²	Tamaño máx. del árido grueso (mm)	Nivel de autocompact.	d _f (mm)	T ₅₀ (segundos)	Aire ocluido (%)	Cemento -filler calizo
24	25	2	650 ± 50	5 - 10	5,5 ± 1,5	300:200



CEDEX

Relación agua/mat. Cementantes (%)	Volumen de árido grueso (m ³ / m ³)	Peso (kg/m ³)						
		agua	cemento	adiciones	Árido fino	Árido grueso	Aditivo superplast.	Aditivo modulador viscosidad
54,1	0,319	162	300	200	784	829	10,5	0,5

8.7 Bibliografía

- 1.- MINISTERIO DE FOMENTO (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Madrid: Ed. Centro de Publicaciones.
- 2.- CALAVERA RUIZ, J.; ALAEJOS GUTIÉRREZ, P.; FERNÁNDEZ GÓMEZ, J.; GONZÁLEZ VALLE, E. y RODRÍGUEZ GARCÍA, F. (2004) *Ejecución y control de estructuras de hormigón*. Ed. INTEMAC. Madrid.
- 3.- AENOR (2007). *NORMA UNE 83361. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo del escurrimiento*. Madrid: Ed. AENOR.
- 4.- AENOR (2007). *NORMA UNE 83362. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Ensayo del escurrimiento con el anillo japonés*. Madrid: Ed. AENOR.
- 5.- AENOR (2007). *NORMA UNE 83363. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Método de la caja en L*. Madrid: Ed. AENOR.
- 6.- AENOR (2007). *NORMA UNE 83364. Hormigón autocompactante. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en V*. Madrid: Ed. AENOR.
- 7.- OHTOMO, T.; ASAKA, S.; KIM, J.Y.; PARK, C.G.; BEAK, S.J.; JUNG, C.S. y TSUTSUMI, Y. (2001). *Self-compacting concrete used for underground diaphragm walls of the world's largest 200,000 kl inground tanks at Inchon LNG terminal in Korea*. Proceedings of the Second International Symposium on self-compacting concrete, pp. 661-670.
- 8.- OHTOMO, T.; SAKAMOTO, J. y SHINDOH, T. (2001). *Applications of high quality underground diaphragm wall using self-compacting concrete to various underground constructions*. Proceedings of the First FIB Congress on self-compacting concrete, pp. 107-114.
- 9.- ACHE. (2008). *Hormigón autocompactante: diseño y aplicación*. Monografía ACHE (M-13). Madrid. Ed. ACHE.



9. RESUMEN

En este Informe Parcial, se recoge el estado del arte del hormigonado de pilotes y pantallas "in situ", exponiendo en sus diferentes apartados los materiales componentes y dosificación de los hormigones, la ejecución del hormigonado, las características de este hormigón, su durabilidad y el control de calidad. También se dedica un último apartado al hormigón autocompactante, que cumple todas las condiciones para ser utilizado en este tipo de elementos estructurales.

Madrid, Julio 2009

Enrique Dapena

Dr. Ingeniero de Caminos
Coordinador del Grupo de Trabajo

VºBº

Fernando Pardo de Santayana

Director del Laboratorio de Geotecnia

FICHA TÉCNICA DE TRABAJO REALIZADO

TÍTULO: RECOMENDACIONES PARA LA EJECUCIÓN DEL HORMIGONADO DE PILOTES Y PANTALLAS "IN SITU"		
CLAVE ACTUACIÓN: 80-507-5-001	CONFIDENCIALIDAD: PÚBLICA () PRIVADA (X)	FECHA EMISIÓN INFORME TÉCNICO: JULIO 2009
CENTRO: LABORATORIO DE GEOTECNIA	PRESUPUESTO (EUROS): (*) 36.000 Euros	
CLIENTE: ASOCIACIÓN DE EMPRESAS DE LA TECNOLOGÍA DEL SUELO Y SUBSUELO (AETESS)		CLAVE CLIENTE (si procede):
PORCENTAJE DE I+D CONTENIDO EN EL TRABAJO: 100%		
DIRECTOR DEL TRABAJO: Juan Enrique Dapena García		
¿CON ESTE INFORME SE CONCLUYE LA TOTALIDAD DE TRABAJOS INCLUIDOS EN LA CLAVE DE ACTUACIÓN? SÍ () NO (X)		
OBJETIVOS		
En este trabajo se recoge el Estado del Arte sobre el hormigón de cimentaciones especiales, incluyendo su puesta en obra. En el texto redactado se detallan los requisitos incluidos en la normativa de aplicación (tanto la española y europea antes mencionadas como otras normativas internacionales específicas consultadas), justificando y explicando su importancia y necesidad. También se incluyen otros aspectos que pueden contribuir a mejorar la calidad del hormigón de estas obras que, aunque no incluidos en la normativa, aparecen descritos en la bibliografía especializada o bien han sido extraídos de la experiencia práctica		
RESUMEN DEL CONTENIDO DEL INFORME		
.El documento está dividido en ocho Capítulos, que cubren los materiales componentes del hormigón y su dosificación, puesta en obra, propiedades del hormigón fresco y endurecido, durabilidad, control de calidad y un último capítulo referente al hormigón autocompactante .En concreto, el Capítulo 2 recoge una clasificación general de las cimentaciones, detallando las características que presentan las cimentaciones especiales, y la necesidad de disponer de reglas de buena práctica para su ejecución. En el Capítulo 3, se describen las características necesarias que deben reunir los materiales componentes del hormigón (cemento, agua, áridos, aditivos y adiciones) y su dosificación, para la obtención de un hormigón con las propiedades adecuadas para su colocación en cimentaciones especiales: gran docilidad y cohesión, alta fluidez mantenida durante largos períodos de tiempo así como capacidad de autocompactación y suficiente trabajabilidad durante todo el proceso de vertido. En el Capítulo 4 se incluyen los aspectos fundamentales que deben cuidarse durante el proceso completo de colocación del hormigón con tubo Tremie, sistema de uso habitual en cimentaciones especiales. Se indican las posibles incidencias que pueden presentarse durante el hormigonado, sus causas y la forma de prevenirlas. Se incluyen asimismo, otros sistemas de colocación menos frecuentes en este tipo de cimentaciones. En el Capítulo 5 se recogen las características que debería cumplir el hormigón para cimentaciones especiales, en particular aquellas que permiten colocarlo en obra de forma adecuada consiguiendo un hormigón compacto, continuo y con las propiedades exigidas. La durabilidad del hormigón de cimentaciones cobra una especial importancia, ya que es relativamente frecuente el contacto con terrenos o agua agresivos que obliga a extremar las precauciones. Los requisitos específicos para estos casos se desarrollan en el Capítulo 6, complementando algunos aspectos no cubiertos por la Instrucción EHE en ambientes de gran agresividad. El Capítulo 7 incluye los requisitos de control de calidad en la Instrucción EHE para las diferentes fases de la ejecución de la cimentación, extrayendo aquellos de aplicación concreta a las cimentaciones especiales. Se complementa esta información con los aspectos particulares de control (partes de hormigonado, ensayos de información, etc) recogidos en la normativa europea de aplicación y en la bibliografía consultada. Finalmente, el Capítulo 8 está dedicado a la tecnología del hormigón autocompactante, cuya dosificación está encaminada a conseguir mezclas fluidas y cohesivas que cierran con facilidad, por lo que existen ciertas similitudes con la tecnología del hormigón autocompactante, aunque este último además utiliza aditivos específicos. Se ha incluido un apartado que describe la experiencia en diversas obras de cimentaciones especiales, en las que se ha utilizado este tipo de hormigón.		

(*) Si no existe presupuesto de convenio (casilla F.4 de la PRI), se pondrá el presupuesto total (casilla F.3)

CONCLUSIONES Y RESULTADOS

El hormigón para cimentaciones especiales, al tratarse de un hormigón estructural y tal como recoge la Instrucción EHE debe fabricarse en central, ya que el producto obtenido presenta una mayor homogeneidad y uniformidad. La central de fabricación de hormigón, dispone de un sistema implantado de control de producción, con almacenamiento de materias primas, sistema de dosificación, equipos de amasado, y en su caso, equipos de transporte. Es recomendable realizar el transporte del hormigón en camiones con cuba cerrada y provistos de agitación. El tiempo transcurrido entre la adición de agua del amasado al cemento y a los áridos y la colocación del hormigón, no debe ser mayor de hora y media, a menos que se adopten medidas especiales como por ejemplo la utilización de aditivos retardadores.

Si se prevé añadir el aditivo en obra, el camión debe ser amasadora y debe disponer del correspondiente equipo dosificador de aditivo y reamasar el hormigón para dispersarlo dentro de la masa de forma homogénea. El tiempo de reamasado será al menos de 1 min/m^3 , y en ningún caso inferior a los 5 minutos.

Cuando el hormigón se amasa completamente en central y se transporta en amasadoras móviles, el volumen de hormigón transportado no debe exceder del 80% del volumen total del tambor. Cuando el hormigón se amasa, o se termina de amasar, en amasadora móvil, el volumen no excederá de los dos tercios del volumen total del tambor.

En el caso del hormigón para cimentaciones especiales, la colocación del hormigón suele realizarse mediante tubo Tremie o por bombeo.

Es preciso que el tiempo entre el final de la perforación y el inicio del hormigonado sea el más breve posible. Cuando esto no pueda ser respetado (por ejemplo, en el caso de jaulas de armaduras complejas), es necesario asegurarse, que se respetan las propiedades del fluido de excavación antes de hormigonar. Es especialmente importante limitar el contenido de arena del lodo (debe ser inferior al 3% de acuerdo con el PG3 y el Código Técnico de la Edificación). Si el lodo no cumple con los parámetros requeridos es preciso llevar a cabo su desarenado o sustitución por lodo limpio.

El hormigonado de pantallas, pilotes sin sostenimiento, pilotes con lodos y pilotes con tubería de revestimiento, debe efectuarse empleando el procedimiento de vertido a través del tubo Tremie, y sólo como excepción, y bajo la expresa autorización del Director de las Obras, se permitirá el bombeo directo en excavaciones en seco. En concreto, el sistema de tubería Tremie es indispensable para el hormigonado de pantallas y pilotes en presencia de agua o lodos de perforación.

En la correcta puesta en obra del hormigón en perforaciones con agua o lodos, se sella la boca del tubo Tremie con una placa o bola. Inicialmente, la tubería debe mantenerse a una distancia máxima de 150 mm (en el caso de placa) ó 100 mm (en el caso de bola) del fondo para permitir que el agua escape.

Durante el hormigonado, la inmersión del tubo Tremie en el hormigón no debe ser nunca inferior a 1,5 m para pilotes y 3 m para pantallas, en especial cuando se desconectan tramos de dicho tubo y cuando se recuperan y desconectan tramos de la entubación provisional. Para pilotes de diámetro mayor o igual que 1,2 m, la inmersión debe ser al menos de 2,5 m y para elementos portantes de sección no circular al menos de 3,0 m, en especial cuando se utilizan dos o más tubos Tremie. La profundidad mínima de inmersión puede reducirse a 2 m si el nivel superior del hormigón se conoce con precisión y cuando el hormigón llega cerca de la superficie del suelo para facilitar el vertido del mismo.

Durante el hormigonado se debe poner el mayor cuidado en conseguir que el hormigón rellene la sección completa en toda su longitud, sin huecos, bolsas de aire o agua, coqueas, etc. Se deben tomar medidas adecuadas para impedir el lavado de los finos del hormigón, debido a la acción de corrientes de agua subterráneas. En este sentido, se debe tener especial precaución cuando en las inmediaciones del pilote se está bombeando agua para mantener el nivel freático. Finalmente, se debe evitar también la segregación del hormigón fresco.

La trabajabilidad del hormigón será tal que permita llevar a cabo satisfactoriamente todo el proceso de hormigonado. Para que pueda realizarse un trabajo continuado, se dispondrá de un adecuado suministro de hormigón durante todo el proceso de vertido. El hormigón fresco se verterá siempre dentro de un hormigón que conserve su trabajabilidad.

Durante la ejecución de pilotes en terreno blando ($c_u \leq 15 \text{ kN/m}^2$), puede ser necesario contener el hormigón fresco en parte o en la totalidad de la longitud del pilote, mediante camisas perdidas o entubados permanentes. En caso de utilizar entubación, ésta se limpiará, de modo que no quede tierra, agua, ni objeto o sustancia que pueda producir disminución en la resistencia del hormigón. Es necesario controlar el volumen de hormigón que se va colocando y compararlo con el volumen teórico de llenado. Si el volumen colocado es significativamente menor al teórico, el elemento ha podido experimentar estrechamientos de la sección de hormigón, colapso de las paredes laterales de la excavación o contaminaciones del hormigón en el tubo Tremie. Si se sospecha la existencia de un defecto semejante, hay que investigar el estado del pilote o rehacerlo antes de que el hormigón fragüe.

Es conveniente que el hormigonado se lleve a cabo a un ritmo superior a $30 \text{ m}^3/\text{h}$. El hormigonado de cada elemento de la cimentación debe realizarse sin interrupción, debiendo el hormigón que circula hacerlo dentro de un período de tiempo equivalente al 75% del comienzo del fraguado. Cuando se prevea un período mayor, deben utilizarse retardadores de fraguado. En excavaciones sin entubación, el hormigón debe quedar totalmente colocado en una única jornada de trabajo.

PALABRAS CLAVE IDENTIFICADORAS DEL TRABAJO (*)**EJECUCIÓN, HORMIGONADO, PILOTES, PANTALLAS, IN SITU**

(*) Máximo cinco palabras (en mayúsculas y sin acentos) que faciliten una posterior búsqueda del informe/actuación.