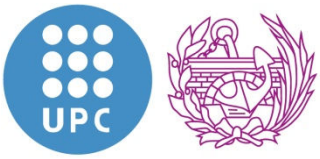


Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

Análisis de la aplicabilidad de arenas de dragado marino como árido fino en morteros y hormigones

Autor/a

Daniel Molina Martínez

Tutor/a

Miren Etxeberria Larrañaga

Jussara Limeira De Araujo

Departament

Enginyeria de la Construcció

Intensificació

Materials de construcció

Data

Mayo 2010

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mis tutoras, Miren Etxeberria Larrañaga y Jussara Limeira de Araujo, porque sin su interés, dedicación y asesoramiento el trabajo realizado no hubiera sido posible, por contar con su apoyo y colaboración en todo momento y porque con sus conocimientos y experiencia me han ayudado a completar el presente estudio.

En segundo lugar, a todo el personal técnico de los laboratorios de Estructuras y Materiales de la Construcción, por la ayuda prestada en el laboratorio durante la fase experimental.

Por último, a mi familia y mis amigos, por estar siempre ahí y por no fallarme nunca.

Gracias a todos.

DANI

ÍNDICE

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos generales 1
1.2 Objetivos 2
1.3 Estructura de la tesina 2

CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción 4
2.2 Arenas de dragado marino 4
2.2.1 Equipos de dragado y técnicas de extracción 4
2.2.1.1 Dragas mecánicas 6
2.2.1.2 Dragas hidráulicas 9
2.2.2 Volúmenes de extracción en Europa 12
2.2.3 Caso de España 16
2.2.4 Normativas nacionales para la extracción de áridos marinos 17
2.2.5 Propiedades físico-químicas de los áridos dragados 18
2.2.6 Tratamientos de los áridos 20
2.3 Propiedades de los materiales cementíceos 21
2.4 Durabilidad del hormigón 23
2.4.1 Patologías de morteros y hormigones 23
2.4.1.1 Carbonatación 24
2.4.1.2 Ataque por cloruros 24
2.4.1.3 Ataque por sulfatos 25
2.4.1.4 Ataque por magnesio 26
2.4.1.5 Reacciones Álcali-áridos 26
2.4.2 Especificaciones para áridos y hormigones en pavimentos portuarios 27
2.5 Aplicaciones 32
2.6 Conclusiones 37

CAPITULO III. MATERIALES Y FABRICACION

3.1 Introducción 38
3.2 Materiales 38
3.2.1 Propiedades del cemento 38
3.2.2 Propiedades de los áridos naturales 39
3.2.3 Propiedades de los áridos de dragado marino 41
3.2.3.1 Caracterización mineralógica 42
3.2.3.2 Caracterización química 43
3.2.3.3 Caracterización física 46
3.2.4 Aditivo 48
3.3 Fabricación de morteros 49
3.3.1 Dosificación 49
3.3.2 Fabricación 51
3.3.3 Enmoldado 53
3.3.4 Curado 53
3.4 Fabricación de hormigones 54
3.4.1 Dosificación 54
3.4.2 Fabricación 56
3.4.3 Enmoldado 58

3.4.4 Curado 59
3.4.5 Refrentado 60

CAPITULO IV. PROPIEDADES DE MORTERO Y HOMIGÓN ENDURECIDOS

4.1 Introducción 62
4.2 Ensayos sobre mortero endurecido 62
4.3 Ensayos sobre hormigón endurecido 64
4.4 Resultados y discusión de las propiedades de mortero endurecido 73
4.4.1 Ensayo de compresión 73
4.4.2 Ensayo de flexo-tracción 77
4.5 Resultados y discusión de las propiedades de hormigón endurecido 81
4.5.1 Ensayos de densidad, absorción y poros accesibles. 81
4.5.2 Ensayo de compresión 82
4.5.3 Ensayo de flexo-tracción 85
4.5.4 Ensayo de tracción indirecta (ensayo brasileño) 87
4.5.5 Ensayo de succión capilar 88
4.5.6 Ensayo de penetración de agua bajo presión 90
4.5.7 Ensayo de abrasión 92
4.5.8 Ensayo de resistencia al impacto 93
4.5.9 Ensayo de velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos (UPV) 93

CAPITULO V. CONCLUSIONES GENERALES

5.1 Introducción 96
5.2 Conclusiones 96
5.3 Futuras líneas de investigación 99

BIBLIOGRAFÍA 100

RESUMEN

Título: Análisis de la aplicabilidad de arenas de dragado marino como árido fino en morteros y hormigones

Autor: Daniel Molina Martínez

Tutora: Miren Etxeberria Larrañaga, Jussara Limeira De Araujo.

El trabajo que se expone a continuación, describe las tareas realizadas con objeto de analizar la aplicabilidad de las arenas de dragado marino como árido fino constituyente de morteros y hormigones para ser utilizados en pavimentos portuarios.

Se realizó una exhaustiva búsqueda de información bibliográfica para verificar la idoneidad del presente estudio, y a la vista de lo investigado hasta hoy, se decidió que era necesario el desarrollo del mismo por la poca información publicada al respecto así como la heterogeneidad de resultados obtenidos.

Se trabajo con tres arenas de dragado marino obtenidas de diferentes zonas cercanas al Puerto de Barcelona. Dichas arenas se utilizaron en diferentes porcentajes (5, 15 y 25% para morteros y 15, 25, 35 y 50% para hormigones) en sustitución de la arena natural 0/5mm procedente de cantera. Una vez determinadas las propiedades mineralógicas, químicas y físicas de los áridos marinos y demás constituyentes de morteros y hormigones, se procedió a la fabricación de los mismos.

Todos los morteros como los hormigones se fabricaron con una relación a/c efectiva de 0.5. Debido a la aplicación final de los hormigones, pavimentación portuaria, los hormigones se trabajaron con una consistencia seca y fue necesario el uso de aditivo superplastificante.

Los morteros fueron ensayados a compresión y flexo-tracción tras 7 y 28 días de curado. En los hormigones, se llevó a cabo un estudio más exhaustivo: se realizaron ensayos de compresión a 7 y 28 días de curado, así como ensayos de densidad, absorción, porosidad accesible, tracción indirecta, abrasión, resistencia al impacto, succión, penetración de agua bajo presión y velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos (UPV), todos ellos a 28 días de curado.

Entre las conclusiones extraídas, destacan que de acuerdo a las propiedades de las arenas de dragado marino del Puerto de Barcelona, dos de las tres arenas estudiadas resultan aceptables para utilizarlas como áridos en morteros y hormigones para pavimentos portuarios. Los hormigones con arenas marinas presentan en la mayoría de los casos resistencias más elevadas a compresión, menor succión capilar, menor penetración de agua y menor pérdida de partículas por abrasión que el hormigón convencional.

ABSTRACT

Title: Analysis of the applicability of marine dredged sand as fine aggregate in mortar and concrete

Author: Daniel Molina Martinez

Tutor: Miren Etxeberria Larrañaga, Jussara Limeira De Araujo.

The following work, describes the tasks performed in order to analyze the applicability of marine dredged sand as fine aggregate in mortar and concrete so as to be used in harbour pavements.

An exhaustive bibliographic research was performed in order to asses the suitability of the present study, and its development was decided to be necessary because of the little published information on the subject and the heterogeneity of the results.

We worked with three marine dredged sand taken from different areas near the Barcelona Harbour. These sands were used in different percentages (5, 15 and 25% for mortar and 15, 25, 35 and 50% for concrete), replacing the natural sand from quarry 0/5mm. After determining mineralogical, chemical and physical properties of marine aggregates and other constituents of mortar and concrete, we proceeded to manufacture them.

All mortars and concretes were made with effective a / c ratio of 0.5. Due to the final application of concrete, harbour pavements, the concrete was worked with a dry consistency and it was required the use of superplasticizer additive.

The mortars were tested at compression and flexural tensile strength after 7 and 28 days. In the concretes, was carried out a further study: compression strength tests were performed after 7 and 28 days of curing, and density, absorption, porosity, flexural tensile strength, abrasion, impact resistance, capillary suction, water penetration depth under pressure and ultrasonic pulse velocity(UPV), all were tested after 28 of curing.

Among the extracted conclusions, it should be emphasize that according to the properties of marine sand dredged from the Barcelona Harbour, two of the three sands studied are acceptable to use as aggregate in mortar and concrete pavement harbours. Concretes made with part of sea sand have in most of cases higher compressive strength, lower capillary suction, lower water penetration and more resistance to abrasion than conventional concrete.

.

Índice de figuras y tablas

TABLAS

CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE (1-10)

Tabla 1.- Clasificación de las dragas actuales. 5
Tabla 2.- Composición de la flota mundial de dragas. 5
Tabla 3.- Sumario de actividades de extracción de áridos marinos en 2006. 14
Tabla 4.- Volumen (m^3) de sedimentos marinos extraídos por comunidades autónomas. 16
Tabla 5.- Composición química media de 1 litro de agua de mar. 19
Tabla 6.- Propiedades de morteros fabricados con material de dragado. 22
Tabla 7.- Limitaciones de las sustancias perjudiciales. 28
Tabla 8.- Límites según el BSI para el ión cloruro. 29
Tabla 9.- Contenido de cloruros en hormigones con áridos marinos 29
Tabla 10.- Valores de contaminantes que determinan los niveles de acción. 31

CAPITULO III: MATERIALES Y FABRICACIÓN (11-28)

Tabla 11.- Características del CEM II/A-L 42,5 R y valores habituales. 39
Tabla 12.- Propiedades de los áridos naturales. 40
Tabla 13.- Coeficiente de forma de los áridos gruesos. 40
Tabla 14.- Desgaste de Los Àngeles del árido grueso. 41
Tabla 15.- Identificación mineralógica de las muestras por difracción de rayos X 42
Tabla 16.- Resultados de la determinación de cloruros solubles en agua. 43
Tabla 17.- Resultados de la determinación de sulfatos. 44
Tabla 18.- Resultados de la determinación de materia orgánica, expresados en porcentaje de materia orgánica y carbono orgánico total. 45
Tabla 19.- Resultados de la determinación de metales pesados en las arenas de dragado. 46
Tabla 20.- Propiedades de los áridos de dragado marino. 48
Tabla 21.- Morteros estudiados. Nomenclatura 49
Tabla 22.- Dosificaciones de los morteros. 50
Tabla 23.- Dosificaciones de los morteros con superplastificante. 51
Tabla 24.- Plastificante utilizado en la fabricación de morteros. 52
Tabla 25.- Hormigones estudiados. Nomenclatura. 54
Tabla 26.- Dosificaciones de los hormigones. 55
Tabla 27.- Consistencias Cono de Abrams. 58
Tabla 28.- Asiento de los hormigones fabricados. 58

CAPITULO IV: PROPIEDADES DE MORTERO Y HORMIGON ENDURECIDOS (29-44)

Tabla 29.- Resultados de los ensayos de resistencia a compresión en morteros. 73
Tabla 30.- Evolución de la resistencia a compresión en morteros, en % 76

Tabla 31.- Resultados de los ensayos de resistencia a flexo-tracción en morteros. 77
Tabla 32.- Evolución de la resistencia a flexo-tracción en morteros, en % 80
Tabla 33.- Resultados de los ensayos de densidad, absorción y poros accesibles en hormigones. 81
Tabla 34.- Resultados de los ensayos de resistencia a compresión en hormigones. 82
Tabla 35.- Evolución de la resistencia a compresión en hormigones, en % 84
Tabla 36.- Resultados de los ensayos de resistencia a flexo-tracción en hormigones. 85
Tabla 37.- 87
Tabla 38.- Resultados de los ensayos de succión capilar en hormigones. 88
Tabla 39.- Líneas de tendencia y coeficientes de succión. 89
Tabla 40.- Resultados de los ensayos de penetración de agua bajo presión en hormigones. 90
Tabla 41.- Resultados de los ensayos de abrasión en hormigones. 92
Tabla 42.- Resultados de los ensayos de resistencia al impacto en hormigones. 93
Tabla 43.- Tiempos de propagación de los impulsos ultrasónicos medidos en los ensayos. 94
Tabla 44.- Resultados de los ensayos UPV en hormigones. 94

FIGURAS

CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE (1-18)

Figura 1.- Esquema de extracción y procesamiento de los áridos marinos. 5
Figura 2.- Partes principales de la dragalina. 7
Figura 3.- Dragado de cuchara sobre pontona (izquierda) y autopropulsada (derecha). 7
Figura 4.- Draga de pala accionada por cables (izquierda) o con accionamiento hidráulico (derecha). 8
Figura 5.- Draga de rosario. 9
Figura 6.- Esquema de una draga de succión en marcha. 10
Figura 7.- Draga de succión estacionaria. 10
Figura 8.- Cabeza trituradora. 11
Figura 9.- Esquema del conducto de succión de una draga dutspan. 12
Figura 10.- Distribución granulométrica de varios elementos granulares: arenas, sedimentos y cemento. 18
Figura 11.- Curvas granulométricas recomendadas para un tamaño máximo de árido de 2mm. 28
Figura 12.- Vista ampliación del Puerto de Rotterdam. 32
Figura 13.- Vista del Great Belt Bridge, que une Dinamarca y Suecia. 33
Figura 14.- Vista de la Thames Barrier. Thames River, London. 33
Figura 15.- Vista Tamar Bridge, Plymouth. 34
Figura 16.- Vista del National Theatre, London. 34
Figura 17.- Ista artificial de Check Lap Kok, Hong-Kong. 35
Figura 18.- Esquema de las Palm Islands y The World, Dubai. 36

CAPITULO III: MATERIALES Y FABRICACIÓN (19-36)

Figura 19.- Granulometría de los áridos naturales. 40
Figura 20.- Granulometría de los áridos de dragado marino 47
Figura 21.- Composición de los diferentes tipos de mortero. 50
Figura 22.- Mezcladora de eje vertical para morteros. 51
Figura 23.- Introducción del mortero en los moldes. 53
Figura 24.- Acabado de los morteros tras compactar y enrasar. 53
Figura 25.- Composición de los diferentes tipos de hormigón. 55
Figura 26.- Mezcladora de eje vertical para hormigones. 56
Figura 26.- Incorporación del cemento. 57
Figura 27.- Incorporación del agua. 57
Figura 28.- Estado de la mezcla tras incorporar el agua. 57
Figura 29.- Incorporación del aditivo. 57
Figura 30.- Estado de la mezcla tras incorporar el aditivo. 57
Figura 31.- Cono de Abrams. Consistencia seca. 57
Figura 32.- Hormigón fresco en los moldes una vez enrasado. 59
Figura 33.- Probetas cilíndricas marcadas en la cámara húmeda. 60
Figura 34.- Probetas prismáticas marcadas en la cámara húmeda. 60
Figura 35.- Dispositivo de refrentado 61
Figura 36.- Probetas cilíndricas refrentadas 61

CAPITULO IV: PROPIEDADES DE MORTERO Y HORMIGON ENDURECIDOS (37-66)

Figura 37.- Máquina de prensado para morteros y hormigones. 63
Figura 38.- Mecanismo de aplicación de las cargas para el ensayo de flexo-tracción. 66
Figura 39.- Esquema del ensayo de succión 67
Figura 40.- Probetas en los moldes para ensayo de penetración de agua. 69
Figura 41.- Probetas durante el ensayo de penetración de agua. 69
Figura 42.- Prensa utilizada en la rotura de probetas del ensayo de penetración de agua. 69
Figura 43.- Tambor para el ensayo de Los Ángeles 70
Figura 44.- Esquema del dispositivo de ensayo de resistencia al impacto. 71
Figura 45.- Sección A-A del dispositivo de ensayo. 71
Figura 46.- Esquema de transmisión directa del ensayo UPV. 72
Figura 47.- Resistencia a compresión de morteros en % respecto REF 74
Figura 48.- Evolución de la resistencia a compresión en morteros. Arena tipo A. 75
Figura 49.- Evolución de la resistencia a compresión en morteros. Arena tipo B. 76
Figura 50.- Evolución de la resistencia a compresión en morteros. Arena tipo C. 76
Figura 51.- Resistencia a flexo-tracción de morteros en % respecto REF. 78
Figura 52.- Evolución de la resistencia a flexo-tracción en morteros. Arena tipo A. 79
Figura 53.- Evolución de la resistencia a flexo-tracción en morteros. Arena tipo B. 79
Figura 54.- Evolución de la resistencia a flexo-tracción en morteros. Arena tipo C. 80
Figura 55.- Resistencia a compresión de hormigones en % respecto HC. 82
Figura 56.- Evolución de la resistencia a compresión en hormigones. Arena tipo A. 83

Figura 57.- Evolución de la resistencia a compresión en hormigones. Arena tipo B. 84
Figura 58.- Evolución de la resistencia a compresión en hormigones. Arena tipo C. 84
Figura 59.- Resistencia a flexo-tracción de hormigones en % respecto HC. 86
Figura 60.- Resistencia a tracción indirecta de hormigones en % respcto HC 87
Figura 61, 62.- Probetas cilíndricas tras el ensayo de tracción indirecta 88
Figura 63.- Succión capilar. 89
Figura 64.- Probetas con la zona inferior impermeabilizada para ensayo de succión capilar. 90
Figura 65.- Probetas durante el ensayo de succión capilar. 90
Figura 66.- Aspecto de las probetas tras el ensayo de penetración de agua bajo presión. 92

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Aspectos generales

En el sector de la construcción, el hormigón es el material más utilizado tanto por las prestaciones que ofrece como por su relación coste/beneficio, que hasta la fecha no ha sido alcanzada por ningún otro material constructivo. La principal característica estructural del hormigón, y por tanto la que hace que sea tan utilizado en construcción, es que resiste muy bien los esfuerzos a compresión.

El hormigón es el material resultante de la mezcla de un conglomerante (normalmente cemento) con áridos (grava, gravilla y arena) y agua. Si únicamente tenemos fracción de arena, lo denominamos mortero.

Los materiales utilizados en la fabricación del hormigón, constituyen una fuente no renovable que tarde o temprano se agotará, particularmente cuando nos referimos a los áridos, que son el constituyente mayoritario de los hormigones.

Los áridos utilizados en la fabricación del hormigón generalmente son naturales y procedentes de canteras o aluviones fluviales. Dichas fuentes de extracción de áridos, se encuentran actualmente en proceso de agotamiento y además su extracción tiene nocivas consecuencias para el medio ambiente. Por estas razones, se busca minimizar el consumo de áridos naturales sustituyéndolos en la medida de lo posible por áridos provenientes de otras fuentes.

En esta investigación, se estudiará el potencial uso de los áridos finos provenientes de dragado marino como sustitutivos de áridos naturales para la fabricación de morteros y hormigones. Las tareas de dragado que nos proporcionan dichos áridos, son esenciales para el funcionamiento y mantenimiento de los puertos y hasta ahora en España, solo está permitido el uso de estos áridos para la reconstitución de playas, siendo el excedente almacenado en locales apropiados o vertido de nuevo al mar. En nuestro país, a diferencia de en otros, no se ha aprobado el uso de éstos como material constructivo.

En la investigación se utilizarán tres muestras diferentes de arena del Puerto de Barcelona. En primer lugar se fabricarán morteros, para posteriormente pasar a fabricar hormigones, y se realizará el análisis del comportamiento estructural de los mismos comparándolo con respecto a morteros y hormigones convencionales.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo consiste en analizar la posible aplicabilidad de las arenas marinas en sustitución (en parte) a la arena de cantera en la fabricación de morteros y hormigones.

Entre los objetivos específicos de este trabajo de investigación destacan:

- Dar una visión de las diferentes técnicas de extracción de áridos de dragado existentes en la actualidad.
- Conocer los volúmenes la extracción de arenas marinas en España y el resto del mundo.
- Conocer el estado en que se encuentran las investigaciones relativas al uso de áridos marinos en la fabricación de morteros y hormigones, más concretamente el uso de arena de dragado.
- Caracterizar las arenas de dragado marino utilizadas en la investigación desde un punto de vista mineralógico, químico y físico.
- Considerar las posibilidades de utilización de la arena de dragado marino como material constituyente de morteros y hormigones de resistencias medias (25-30 MPa), atendiendo al cumplimiento de las especificaciones técnicas.
- Fabricar en el laboratorio morteros y hormigones con diferentes tipos y porcentajes de arenas marinas.
- Ensayar las probetas fabricadas en el laboratorio.
- Analizar los resultados obtenidos.
- Obtener conclusiones.
- Considerar las posibilidades de utilización de la arena de dragado marino como material constituyente de morteros y hormigones de resistencias medias (25-30 MPa).

1.3 Estructura de la tesina

La tesina está formada por 5 capítulos diferenciados basados en los diferentes análisis llevados a cabo durante el trabajo de investigación.

En el capítulo 1, en el que está incluido este apartado. Se muestra una contextualización general del tema que nos ocupa, así como los objetivos perseguidos y la estructura adoptada para la presentación del trabajo.

En el capítulo 2 se presenta el estado del arte de las arenas procedentes de dragado marino. Este capítulo es fruto de un trabajo de recopilación de información acerca del tema de estudio, que nos permitirá conocer el punto en el que se encuentra la investigación sobre el uso de estas arenas actualmente.

En el capítulo 3, se describen los trabajos experimentales llevados a cabo en el laboratorio de Materiales de Construcción que permiten la caracterización de los materiales utilizados así como la elección de la dosificación y el proceso de fabricación hasta la obtención de las probetas de morteros y hormigones que posteriormente ensayaremos mecánicamente.

En el capítulo 4, se describen los ensayos llevados a cabo en el laboratorio sobre los morteros y hormigones obtenidos en el capítulo anterior, además, se analiza el resultado de dichos ensayos comparando en todo momento con los resultados obtenidos en morteros y hormigones convencionales o de referencia.

Por último, en el capítulo 5 se recogen las conclusiones derivadas del trabajo experimental y se proponen futuras líneas de investigación que den continuidad al presente estudio.

CAPITULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En este capítulo se tratará de dar una visión precisa del estado del conocimiento respecto a la utilización y viabilidad de las arenas de dragado como árido fino en la fabricación de morteros y hormigones.

En primer lugar se describirán los equipos y técnicas de extracción de áridos utilizados en la actualidad y se darán unas aproximaciones de los volúmenes de extracción en los diferentes países europeos analizando más detenidamente el caso de España y haciendo hincapié en la normativa reguladora existente en el país.

Posteriormente, se expondrán las propiedades físico-químicas determinadas por diversos estudios sobre áridos marinos realizados en varios países y se propondrán algunos tratamientos para las sustancias contaminantes que se han seleccionado por haberse desarrollado con éxito.

Tras lo anterior, se mostrarán los resultados obtenidos en diversos trabajos experimentales llevados a cabo sobre morteros y hormigones fabricados con este tipo de áridos y se darán las especificaciones pertinentes que tanto áridos como hormigones deben cumplir para su utilización en pavimentos portuarios.

Por último, se mostrarán las diferentes aplicaciones dadas a los áridos de dragado marino actualmente y se expondrán varios ejemplos de cómo éstos han formado parte de proyectos constructivos específicos en diversos países.

2.2 Arenas de dragado marino

2.2.1 Equipos de dragado y técnicas de extracción

El dragado, es una operación necesaria para el desarrollo y mantenimiento de las infraestructuras en el medio marino y fluvial. Los dragados resultan esenciales en obras portuarias, tanto en el mantenimiento y mejora de calados, como en el desarrollo de nuevas instalaciones.

Entendemos como obras de dragado el conjunto de operaciones que engloban la extracción, el transporte y el vertido de los materiales que se encuentran bajo el agua, independientemente de que se trate de un medio lacustre, fluvial o marino.
El proceso se inicia con la localización del material a través de radares incorporados en la unidad de draga. Una vez extraído dicho material mediante las técnicas y equipos disponibles, se transporta y se trata si es necesario para darle un posterior uso o simplemente verterlo de nuevo al mar. El vertido normalmente se realiza a partir de pequeñas barcazas o tuberías de distribución.

En la siguiente figura se presenta un esquema del proceso seguido por los materiales de dragado desde su extracción hasta su vertido de nuevo al mar:

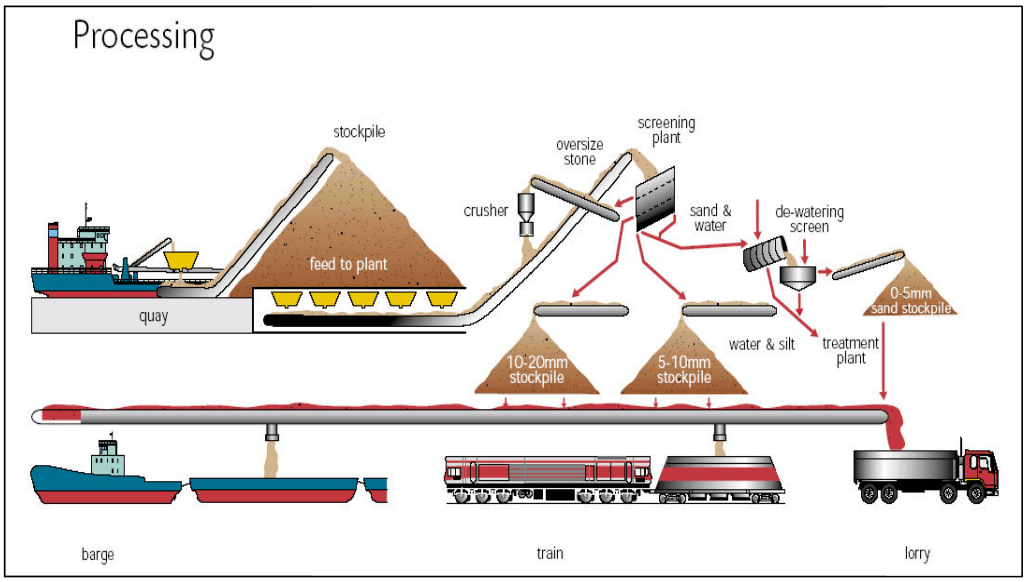


Figura 1.- Esquema de extracción y procesamiento de los áridos marinos ***[1]***.

Algunos equipos de dragado son capaces de realizar las tres fases de operación (excavación, transporte y vertido), otros, se han sido diseñados para realizar una de ellas y requieren equipos auxiliares.

Actualmente existe una gran variedad de equipos de dragado que clasificaremos en función del método de excavación que utilizan (mecánico o hidraúlico).

La tabla siguiente muestra los principales equipos de dragado existentes en la actualidad.

Tabla 1.- Clasificación de las dragas actuales.

Tipos de dragas	
Mecánicas	**Hidraúlicas**
Dragalina	Succión en marcha
Cuchara	Cortadora
Pala	Succión estacionaria
Rosario	Dustpan

La elección de un tipo de maquinaria de dragado u otro, tiene en cuenta numerosos factores como pueden ser: el emplazamiento, factores marítimos y meteorológicos, el tipo de sedimento, el tráfico marítimo, la distancia al punto de vertido, el destino del material, las características del terreno, el tipo de obra, el volumen a dragar, el grado de contaminación del material y sobre todo, el factor económico.

Según datos de 1997 **[2]**, las dragas hidráulicas representaban el 60% de la flota mundial, y las mecánicas el 40% restante. Las dragas cortadoras o "cutter" son las más abundantes, con casi un 37% de la flota, seguidas de las de cuchara con un 24.5%.

Prácticamente la mitad de la maquinaria mundial se concentra en tan sólo cinco países: Estados Unidos, Países Bajos, Bélgica, Reino Unido y Japón **[2]**.

La siguiente tabla presenta un resumen de la distribución de la flota mundial de dragas:

Tabla 2.- Composición de la flota mundial de dragas ***[2]***

Tipo de draga	Unidades	%
Succión en marcha	358	14,20%
Succión estacionaria	235	9,30%
Cortadora	930	36,80%
Rosario	259	10,20%
Cuchara	620	24,50%
Pala	98	3,90%
Dragalina	28	1,10%
Total	**2528**	**100,00%**

2.2.1.1 Dragas mecánicas

Las dragas mecánicas utilizan medios exclusivamente mecánicos para la excavación y extracción del material. El uso de estas dragas está recomendado para trabajos en zonas confinadas y pueden operar fácilmente con materiales sueltos y pesados, aunque también son adecuadas para todo tipo de suelos. El material excavado suele tener un bajo contenido en agua, puesto que no se precisa la dilución del material. El rendimiento suele ser inferior al de las dragas hidráulicas dado que el tipo de trabajo es discontinuo, y el acabado es menos uniforme.

A continuación se realizará una breve descripción de los principales tipos de dragas mecánicas **[3], [4]**:

- Dragalinas: constan de una grúa con una pluma de gran longitud y dos tambores de cable, uno de elevación y otro de arrastre, montados sobre una pontona (figura 2). Del cable de elevación se suspende una cuchara que, una vez depositada sobre el fondo, se desplaza mediante el cable de arrastre.

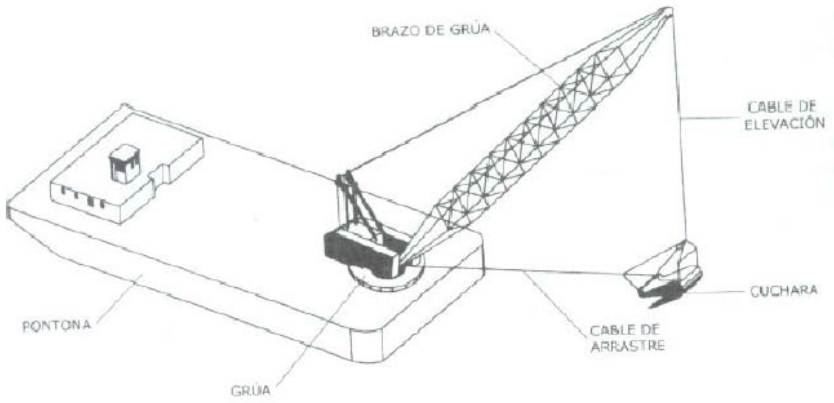


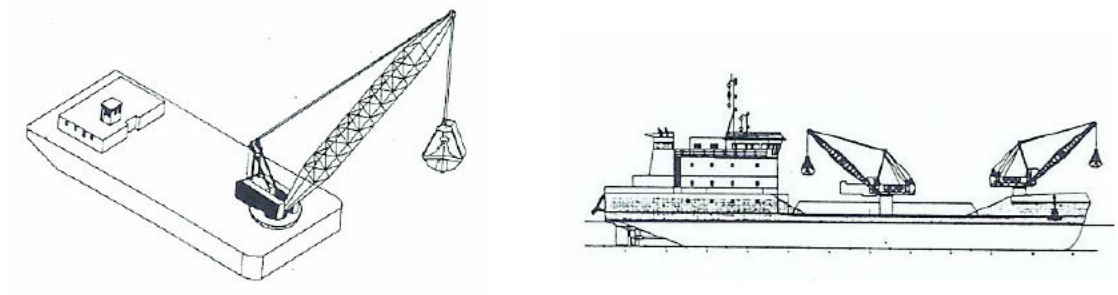
Figura 2.- Partes principales de la dragalina.

Las dragalinas se utilizan únicamente en la limpieza de canales y creación de nuevos cauces. El material extraído se puede verter en tierra para su posterior transporte, o se puede dejar en el mismo cauce, fuera del canal de navegación, esperando que las corrientes lo arrastren.

En caso de dragados en cauces estrechos, la dragalina trabaja desde tierra. El sistema no permite tener precisión en los perfiles de dragado y por tanto la excavación es muy irregular.

- Dragas de cuchara: constan de una grúa que acciona una cuchara de valvas encargada de efectuar la excavación. La grúa puede trabajar desde tierra, desde una pontona, o puede estar montada sobre un gánguil, tratándose en este caso de una draga autopropulsada (figura 3).

Figura 3.- Draga de cuchara sobre pontona (izquierda) y autopropulsada (derecha).



Las dragas de cuchara se utilizan principalmente para trabajos localizados o de pequeño volumen, donde no se puede operar con otro tipo de dragas debido a sus dimensiones, o no es rentable su movilización. Son adecuadas para el mantenimiento de puertos, en muelles, o en zonas periféricas de espigones. En muchos casos, se utilizan para la extracción de áridos.

La profundidad a la que puede operar la draga depende únicamente de la resistencia del cable metálico izador. Las profundidades máximas de dragado

oscilan entre los 40 y los 50 metros. La excavación realizada por estas dragas es muy irregular debido al poco control que se tiene sobre el movimiento de la cuchara.

- Dragas de pala: están constituidas por una pala excavadora montada sobre una pontona que está fondeada mediante tres pilones metálicos que aportan la reacción necesaria al esfuerzo de excavación. Pueden ser frontales (comunes en EEUU) o retroexcavadoras (comunes en Europa), siendo el funcionamiento muy similar. La diferencia entre ellas reside en la orientación del cucharón y el diseño del brazo excavador. Son dragas estacionarias, por lo que necesitan descargar el material en barcazas que se sitúan en los laterales del pontón. La pala puede estar articulada por cables o mediante accionamiento hidráulico (figura 4).

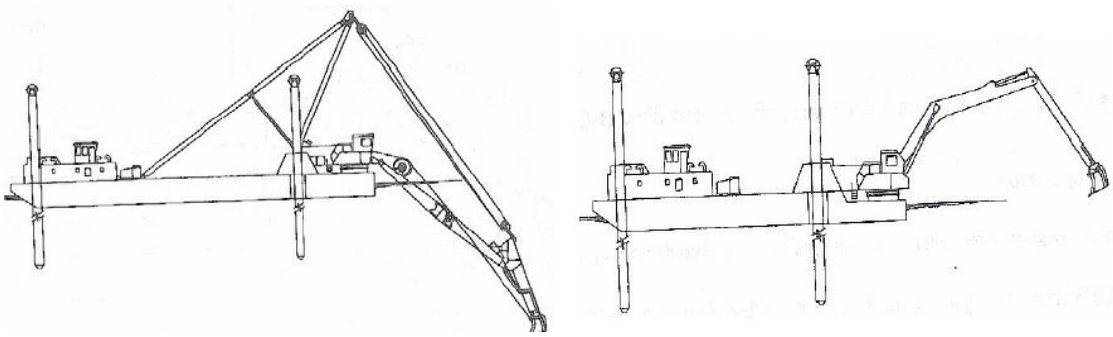


Figura 4.- Draga de pala accionada por cables (izquierda) o con accionamiento hidráulico (derecha).

Las dragas de pala son adecuadas para trabajos localizados. Su sistema de fondeo mediante pilones les permite desplazarse fácil y rápidamente. Resultan muy útiles en dragados de canales y zanjas, aunque también se suelen emplear para la extracción de restos de estructuras, escolleras y demoliciones de diques.

La profundidad de dragado es limitada, oscilando entre 2 y 20 metros. Sin embargo, estos equipos permiten tener un control muy preciso de la posición y de la profundidad del dragado, controlados en todo momento por ordenador y por tanto la excavación es más uniforme que en el caso de las dragas de cuchara, aunque sigue siendo irregular, con errores en vertical de unos 40 centímetros.

- Dragas de rosario: son embarcaciones o pontonas equipadas con una cadena de cangilones (rosario) montada sobre una escala inclinada (figura 5). El sistema se dispone inclinado siendo el ángulo óptimo de trabajo de 45º. Para poder mantener esta inclinación a diferentes profundidades de dragado, el eje de la escala tiene diferentes posiciones. Al girar el rosario, mediante unos tambores prismáticos situados en los puntos extremos de la escala, los cangilones excavan el fondo y elevan el material hasta la draga, descargándolo cuando invierten su posición al pasar por el tambor superior. El material se descarga en un depósito donde, a través de unas canaletas, pasa a los gánguiles situados en los laterales de la embarcación.

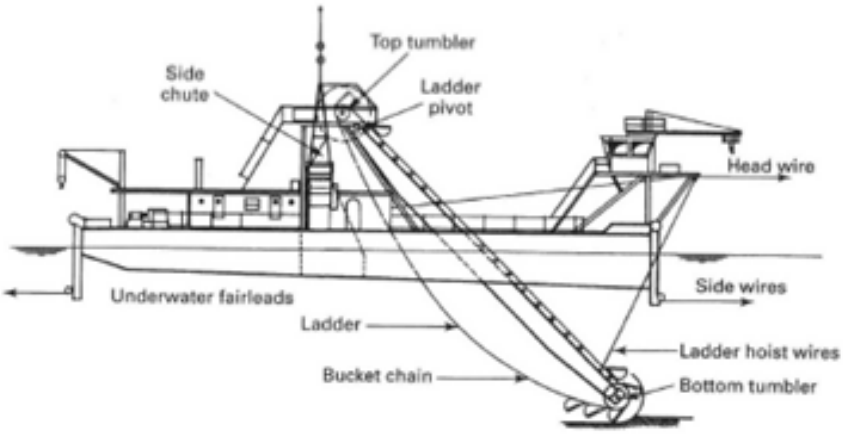


Figura 5.- Draga de rosario

Las dragas de rosario son muy útiles en la excavación de zanjas para muelles o diques, puesto que trabajan con una gran precisión en el fondo.
La profundidad de dragado oscila entre los 5 y los 35 metros. Es la única draga mecánica que trabaja de forma continua, lo que supone un rendimiento elevado y a su vez permite conseguir un perfil de terreno muy regular y de gran calidad. Los errores en la vertical son de unos 20 metros.

Pero las dragas de rosario presentan un gran inconveniente. Sus costes de construcción son superiores a los de otras dragas de la misma capacidad productiva, por lo que actualmente se utilizan en contadas ocasiones.

2.2.1.2 Dragas hidráulicas

La característica fundamental del dragado hidraúlico es el empleo de la bomba de succión. Los diferentes tipos se distinguen en la forma de transportar el producto, la utilización de equipos complementarios para la disgregación del terreno y la forma de facilitar la absorción de los productos por la corriente producida por bombas.

De forma general, las dragas hidráulicas son más eficientes que las dragas mecánicas gracias a su sistema de dragado continuo. En contrapartida, el sistema obliga a diluir el sedimento, obteniendo una pulpa de densidad menor.

A continuación se realizará una breve descripción de los principales tipos de dragas hidraúlicas **[3], [4]**:

- Dragas de succión en marcha o de arrastre: son embarcaciones autoportantes y autopropulsadas, de dimensiones variables, diseñadas para dragar de forma continua elevados volúmenes de material de una manera sencilla y económica, y admitiendo condiciones marítimas adversas (figura 6). El material es aspirado por un tubo dotado en su extremo de un cabezal de succión. A bordo de la embarcación se instala una bomba que crea el vacío necesario en el cabezal para poner en suspensión los materiales sueltos en el agua, y se aspira la mezcla agua-material que se almacena en la cántara de la draga. Durante el proceso de

dragado, el barco sigue en movimiento, aunque a una velocidad muy inferior a la de crucero.

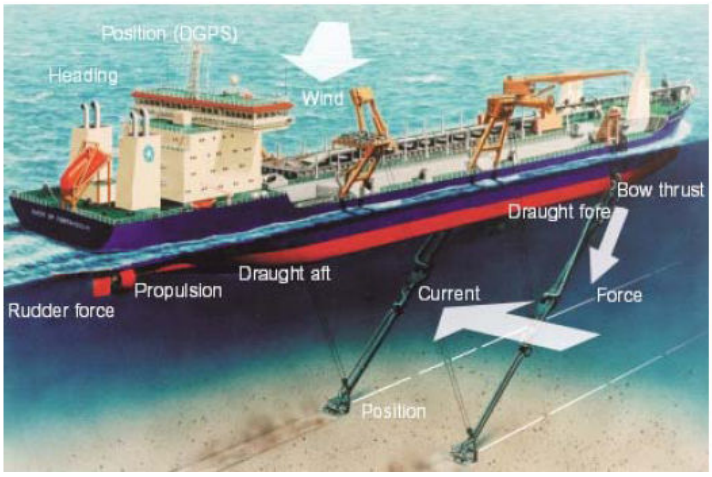


Figura 6.- Esquema de una draga de succión en marcha ***[5]***

Las aplicaciones de las dragas de succión en marcha son numerosas, pudiéndose utilizar tanto en dragados de mantenimiento de canales o puertos, como en alimentaciones de playas. Son los equipos que mejor resisten condiciones marítimas adversas. Sus dimensiones le impiden trabajar en zonas cerradas.

En general, estas trabajan entre 4 y 50 metros de profundidad. El volumen de producción obtenido con estos equipos es muy elevado.

- Dragas de succión estacionarias: presentan gran similitud con las dragas de succión en marcha. Sin embargo, se encuentran ancladas en un punto al realizar la succión del material (figura 7) y no incorporan cántaras, por lo que el transporte se realiza mediante gánguiles auxiliares o tuberías si la zona de vertido está próxima a la de extracción.

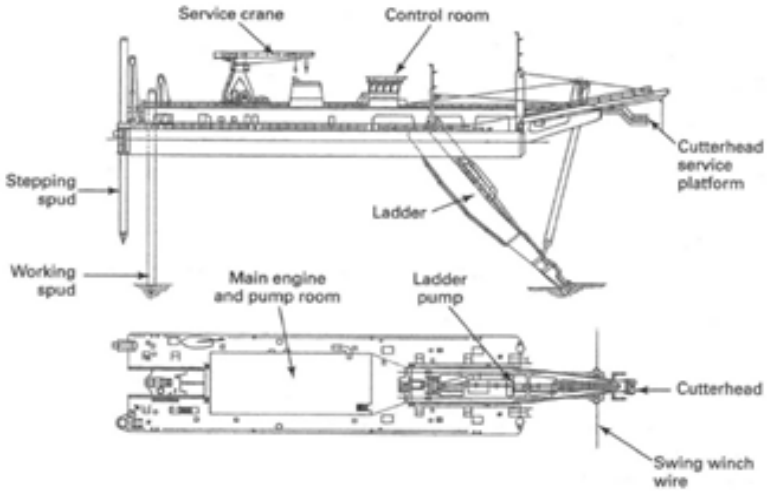


Figura 7-. Draga de succión estacionaria

Las dragas de succión estacionarias tienen su principal aplicación en la extracción de material granular para restaurar terrenos, pero no en el mantenimiento de canales o nivelación, donde se requiere una mayor precisión.

La profundidad mínima de operación de estas dragas se sitúa entorno a los 3metros y alcanzan profundidades de hasta 50 metros.

- Dragas cortadoras ("Cutter"): son una mejora de las dragas de succión estacionarias, ya que incorporan un dispositivo disgregador del terreno en el extremo del tubo de succión. El cabezal cortador (figura 8) presenta una resistencia al corte superior al resto de dragas hidráulicas. Este cabezal giratorio disgrega el material y succiona la pulpa mediante un sistema de bombeo. El sistema está colocado sobre una pontona sin capacidad de propulsión. El material aspirado puede verterse en gánguiles que se sitúan en los laterales de la pontona o, como es más frecuente, trasladarlo directamente a través de una tubería flotante o sumergida hasta la zona de deposición.

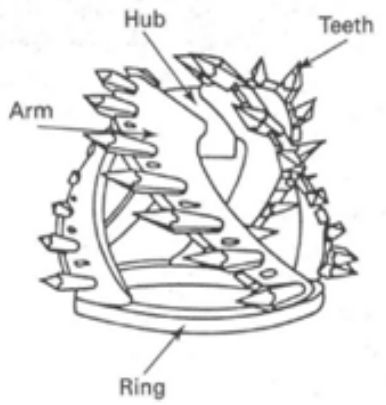


Figura 8.- Cabeza trituradora

Las dragas cortadoras tienen un campo de aplicación muy amplio, pudiéndose emplear para la restauración de terrenos, tareas de relleno, excavación de trincheras, canales y dársenas en terrenos vírgenes, pero siempre en zonas abrigadas.

Las profundidades alcanzadas con estos equipos no son muy elevadas, oscilando generalmente entre 1 y 30 metros pero dado el tipo de trabajos que efectúan, raramente necesitan operar a profundidades mayores. Por otro lado, las dragas cortadoras permiten obtener superficies de corte precisas siguiendo un perfil predeterminado.

Debido a sus costes de instalación y movilización, las dragas cortadoras se utilizan cuando hay grandes volúmenes a dragar. Sin embargo, gracias a su elevada productividad, se trata de los equipos más económicos y por tanto los más utilizados en el mundo.

- Dragas dustpan: son una variante de las dragas estacionarias de succión. Tienen la particularidad de estar dotadas de una cabeza especial muy ancha y baja, reforzada por un sistema de inyección de agua que pone el producto en suspensión y mediante la corriente de aspiración la draga absorbe el material. El material se vierte al mismo cauce, donde las corrientes del río se encargarán de transportarlo. En la figura siguiente se muestra un esquema del conducto de succión:

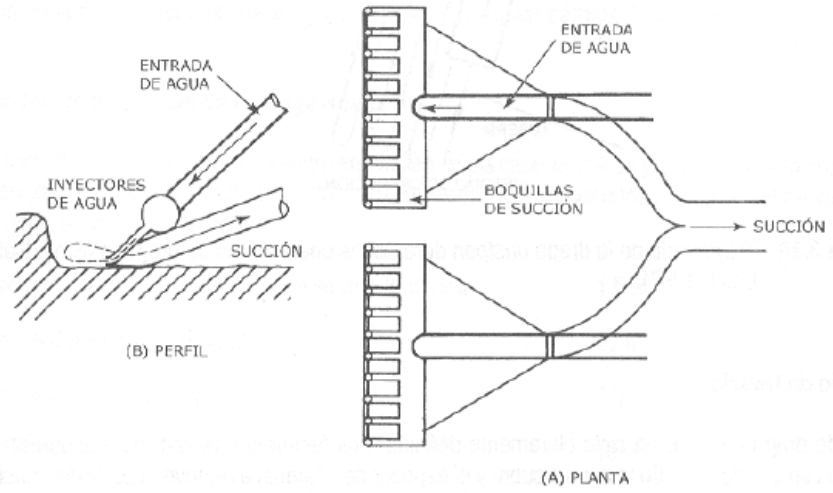


Figura 9.- Esquema del conducto de succión de una draga dustpan ***[6]***

Las dragas Dutspan surgieron en Estados Unidos para el dragado de ríos con fuertes corrientes y fondos compuestos por fangos. Actualmente su principal aplicación es remover el suelo de canales de navegación que han quedado intransitables para embarcaciones de gran tamaño, así como la extracción de material granular en zonas confinadas.

Las profundidades de dragado oscilan entre los 1.5 y 20 m

2.2.2 Volúmenes de extracción en Europa

Según el estudio realizado por el ICES WGEXT (international Council for the Exploration of the Sea) **[7]**, la mayor parte de las extracciones de áridos marinos se han llevado a cabo en áreas del Mar del Norte, seguidas de las extracciones del Mar Báltico, el Canal Inglés, el Mar irlandés y el Atlántico Norte.

Para tratar el impacto medioambiental que los dragados marinos suponen, se han creado viarias convenciones, como son la OSPAR O HELECOM, vigentes actualmente.

La Convención OSPAR **[8]**, cuyo objetivo es la protección del ambiente marino en el Noreste Atlántico, (Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic) entró en vigor en mayo del 1998 unificando y extendiendo las anteriores Convenciones de Oslo y París y por tanto, las decisiones, recomendaciones

y demás acuerdos adoptados por estas convenciones continuarán siendo aplicables. Participan en la OSPAR: Bélgica, Dinamarca, la Comunidad Europea, Finlandia, Francia, Alemania, Islandia, Irlanda, Países Bajos, Noruega, Portugal, España, Suecia, el Reino Unido e Irlanda del Norte, Luxemburgo y Suiza.

La Convenciones de Helsinki, o HELCOM **[9]**, (Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area) tiene como objetivo la protección del medio ambiente marino del Océano Báltico respecto a todas las fuentes de polución en cooperación intergubernamental con Dinamarca, Estonia, la Comunidad Europea, Finlandia, Alemania, Letonia, Lituania, Polonia, Rusia y Suecia.

En la siguiente tabla resumen podemos ver el sumario de áridos extraídos durante el año 2006 en los diferentes países:

Tabla 3.- Sumario de actividades de extracción de áridos marinos en 2006 ***[7]****.*

PAÍS	EXTRACCIONES DE ÁRIDOS (M^3)	EXTRACCIONES DE NO-ÁRIDOS (M^3)	EXPORTACIONES DE ÁRIDOS (M^3)	RELLENO DE PLAYAS (M^3)	TOTAL (M^3)	NUEVOS MAPAS DISPONIBLES	NUEVAS LEGISLACIONES	NUEVAS POLITICAS	EIA INICIADOS	EIA EN MARCHA	EIA TERMINADOS	EIA PUBLICADOS
Bélgica	1.588.614	0	0	389.350	1.977.964	No	No	No	No	No	Yes	Yes
Canadá	0	0	0	0	0	N/d	No	No	No	No	No	No
Dinamarca (No OSPAR)	1.270.000				1.760.000[1]	No	No	No	N/d	N/d	N/d	N/d
Dinamarca (OSPAR)	1.420.000	2.300	530.000	1.830.000	5.600.000	No	No	No	N/d	N/d	N/d	N/d
Estonia	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Finlandia	2.196.707	0	0	0	2.196.707	Yes	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes
Francia	5.000.000	N/d	N/d	N/d	5.000.000	Yes	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No
Alemania (HELCOM)	147.411*	N/d	N/d	1.250.000	1.397.411	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Alemania (OSPAR)	215.212*	N/d	N/d	1.279.153	1.494.365	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Islas Feroe y Groenlandia	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Islandia	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Irlanda	0	11.900	0	0		Yes	No	No	No	No	No	No
Letonia	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Lituania	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Países Bajos	11.913.000	247.345[2]	3.362.000	11.457.000	23.370.000	Yes[3]	Yes	No	Yes	Yes	No	No
Noruega	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Polonia	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
Portugal	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d	N/d
España		0	0	116.869	116.869	No	Yes	No	No	No	Yes	No
Suecia	0	0	0	0	0	Yes	No	No	No	No	Yes	No
Reino Unido[4]	12.466.970	0	4.044.975	2.165.924	14.632.895	Yes	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Estados Unidos	1.220.000	0	0	1.615.000	2.835.000	Yes	No	No	No	No	No	No

El volumen total de extracción se ha mantenido relativamente estable durante el año 2006, a pesar de un modesto aumento observado en la producción general sobre las cifras de 2005.

Arenas y gravas han representado más del 95% del material extraído y su empleo se ha destinado principalmente a actividades de construcción, relleno de playas, defensa de costas y recuperación de tierras.

Como vemos, los Países Bajos, Reino Unido, Dinamarca y Francia son los principales productores.

Los Países Bajos siguen siendo los usuarios predominantes de arena de dragado marino con significativa diferencia del resto. Para la recarga de las playas y la defensa costera utilizaron en 2006 algo menos del 50% de su producción total. En el Reino Unido la proporción utilizada para la recarga de las playas es mucho menor, alrededor del 12% de su producción. Por otro lado, el Reino Unido es el principal exportador de material de dragado de la zona ICES, dedicando a ello el 22% de su producción.

No se informó en ningún caso de las extracciones llevadas a cabo en Portugal, Groenlandia, Islandia, Lituania, Noruega, Polonia o Estonia.

Las cifras muestran que el material destinado a regenerar las playas y proteger las cosas, supone una proporción significativamente menor del total que la destinada al mercado de la construcción comercial.

La mayor parte de los países de los que se poseen datos, utilizaron solo parte de la recuperación de arenas en la regeneración de playas, a excepción de España, único país en el que el 100% de la producción se dedicó a estos fines. Por tanto, las cifras muestran que una proporción significativamente elevada respecto del total de recuperación es destinada al mercado de la construcción comercial.

2.2.3 Caso de España

Según datos del ICES 2007 **[7]** , en el año de 2006 la única actividad de extracción de sedimentos marinos ocurrida en aguas del Atlántico español tuvo lugar en La Coruña (Galicia) con un total de 116.869m^3 de arena extraída. Dicha arena fue destinada a la recuperación de la playa de Santa Cristina. Fueron dos las áreas de explotación: la Ría del Pasaje (85.948,50m^3 extraídos) y el área oeste de la playa de Santa Cristina (30.919,50m^3 extraídos).

El relleno de playas es la única actividad permitida en España para el empleo de sedimentos marinos extraídos.

En la tabla se ilustran los volúmenes en m^3 de sedimentos marinos extraídos en España en cada comunidad autónoma en el período comprendido entre 1990 y 2006:

*Tabla 4.- Volumen (m^3) de sedimentos marinos extraídos por comunidades autónomas**[7]**.*

AÑO	GALICIA	ASTURIAS	CANTABRIA	PAIS VASCO	ANDALUCIA (ATLANTICO)*	CANARIAS	TOTAL
1990	0	0	0	0	82.030	0	**82.030**
1991	0	0	0	0	663.797	0	**663.797**
1992	519.033	0	0	0	796.400	0	**1.315.433**
1993	1.049.733	0	0	0	861.658	274.785	**2.186.176**
1994	0	0	0	1.200.000	1.108.442	444.532	**2.752.974**
1995	0	130.000	21.000	0	210.834	54.000	**415.834**
1996	0	0	50.000	0	1.267.981	160.000	**1.477.981**
1997	0	0	0	50.000	1.617.668	0	**1.667.668**
1998	0	0	0	0	1.408.231	0	**1.408.231**
1999	0	0	0	42.000	450.000	0	**492.000**
2000	0	0	0	210.000	200.000	0	**410.000**
2001	0	0	83.295	215.000	0	0	**298.295**
2002	0	0	0	83.500	0	0	**83.500**
2003	460.000	0	0	275.000	456.016	0	**1.191.016**
2004	0	492.660	20.000	0	280.000	0	**792.660**
2005	0	48.662	0	0	0	0	**48.662**
2006	116.869	0	0	0	0	0	**116.869**
TOTAL	**2.145.635**	**671.322**	**174.295**	**2.075.500**	**9.403.057**	**933.317**	**15.403.126**

Se han desarrollado tres proyectos diferentes para el relleno de playas utilizando arenas dragado marino dentro de los puertos de Ares – La Coruña con 16.783m^3 colocados en la playa de Areamorta; puerto de Huelva con 90.000m^3 colocados en la playa de Castilla y en el puerto de Conil, y 30.000m^3 colocados en la playa de Fuente del Gallo. Según las conclusiones del OSPAR BDC 06, estas operaciones realizadas dentro de los puertos no son consideradas como explotación de sedimentos marinos y por lo tanto no se han incluido en la tabla anterior.

2.2.4 Normativas nacionales para la extracción de áridos marinos

El Ministerio de Medio Ambiente trata la extracción de agregados marinos en el documento "Utilización del dominio público marítimo terrestre" **[10]**.

Sección 3ª Extracciones de áridos y dragados

Artículo 63.

1. Para otorgar las autorizaciones de extracciones de áridos y dragados, será necesaria la evaluación de sus efectos sobre el dominio público marítimo-terrestre, referida tanto al lugar de extracción o dragado como al de descarga en su caso. Se salvaguardará la estabilidad de la playa, considerándose preferentemente sus necesidades de aportación de áridos.

2. Quedarán prohibidas las extracciones de áridos para la construcción, salvo para la creación y regeneración de playas.

3. Entre las condiciones de la autorización deberán figurar las relativas a:

   a) Plazo por el que se otorga.
   b) Volumen a extraer, dragar o descargar al dominio público marítimo-terrestre, ritmo de estas acciones y tiempo hábil de trabajo.
   c) Procedimiento y maquinaria de ejecución.
   d) Destino y, en su caso, lugar de descarga en el dominio público de los productos extraídos o dragados.
   e) Medios y garantías para el control efectivo de estas condiciones.

4. En el caso de que se produjeran efectos perjudiciales para el dominio público y su uso, la Administración otorgante podrá modificar las condiciones iniciales para corregirlos, o incluso revocar la autorización, sin derecho a indemnización alguna para su titular.

Por otra parte, existen dos nuevas leyes relacionadas con la gestión medioambiental que complementan la actual legislación sobre la extracción de sedimentos marinos **[7]**:

- Ley 9/2006 del 28 de abril, con el objetivo de evaluar los efectos de determinados planes y programas de medioambiente. Introduce en la legislación española la evaluación ambiental estratégica de planes y programas y se incorpora a la Directiva 2001742/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, del 27 de junio de 2001. También hay una modificación del Real Decreto Legislativo 1302/1986, del 28 de junio, sobre la evaluación del impacto ambiental, para transponer correctamente las Directivas 85/337/CE y 97/11/CE;

- Ley 27/2006, del 18 julio, que regula los derechos de acceso a la información, participación pública y el acceso a la justicia en temas del medioambiente (se incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE).

2.2.5 Propiedades físico-químicas de los áridos dragados

Atendiendo a la caracterización física realizada por diversos estudios sobre materiales de dragado extraídos de diferentes partes de la costa europea y norteamericana, podemos afirmar que se trata de un material de naturaleza muy fina. Se denominan finos a la fracción de material que pasa por el tamiz 0,125 mm, y más del 90% de las arenas de dragado analizadas, pertenecen a esta categoría. Además, en dichos estudios, la principal fracción del material (aproximadamente un 60% del total) ha resultado ser la correspondiente a limos (material entre 63 y 2 micras), seguido de un 35% de arenas (material de tamaño superior a 0,63 micras) y un 5% de arcillas (material de tamaño inferior a 2 micras). Por tanto, dicho material se utiliza fundamentalmente como filler (material que pasa por el tamiz 0,063mm). A pesar de ello, el contenido de partículas finas cambia con la localización y el tiempo. Los valores típicos dados en la literatura están entre el 51% y 80-95% **[11]**, **[12]**.

La figura 10 muestra una de las distribuciones granulométricas típicas de las fracciones de áridos marinos utilizadas en la fabricación de morteros y hormigones a modo de ejemplo:

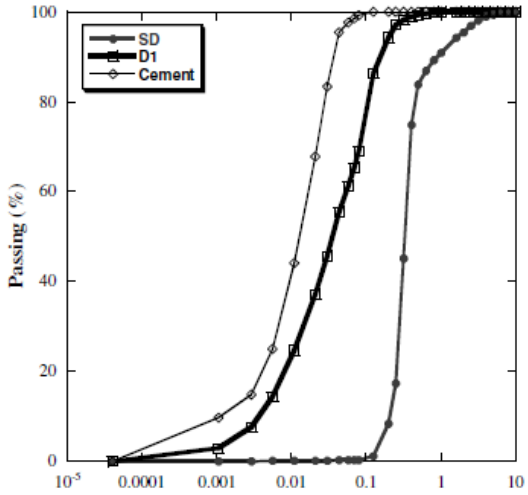


*Figura10.- Distribución granulométrica de varios elementos granulares: arenas, sedimentos y cemento**[13]**.*

Las absorciones de las arenas de dragado marino observadas varían entre 0,8 y 2% y las densidades se sitúan entre los 2,50 y 2,70 kg/dm^3, siendo valores bajos debidos a la presencia de materia orgánica **[13]**.

Estudios específicos a cerca del efecto del contenido de materia orgánica en los límites de consistencia, ha revelado un significante efecto sobre el índice de plasticidad, aumentándolo **[14]**.

Usualmente, la medida inicial del contenido de agua está entorno al 150%, típico de materiales extraídos del mar, y depende principalmente del tipo de sedimento, pero también del equipo utilizado para dragar**[13]**.

Según los estudios de W. Gutt y R. J. Collins **[15]**, el origen geológico de los áridos marinos, es semejante al de los áridos comúnmente utilizados en la fabricación del hormigón. De hecho, se trata de áridos naturales que quedaron sumergidos debido al aumento del nivel del mar desde la era glacial.

Las principales diferencias que podemos encontrar entre los áridos naturales y los obtenidos del dragado marino, residen en la presencia de sales, conchas y posible contenido de materia orgánica en los segundos, aspectos que deben ser controlados si queremos utilizarlos como constituyentes del hormigón, puesto que son agentes que en cantidades excesivas, pueden provocar el desarrollo de diferentes patologías que analizaremos posteriormente, como la corrosión de armaduras o el aumento de la permeabilidad.

En cuanto al contenido en sales, los áridos procedentes de dragado marino, presentan los cloruros y sulfatos característicos del agua de mar, por estar en contacto con ella.

A pesar de que la salinidad y la composición química del agua marina varía de un mar a otro, lo que comporta cambios de densidad así como otros parámetros físicos y químicos, podemos obtener una composición química media aproximada (tabla 5) **[16]:**

Tabla 5.- Composición química media de 1 litro de agua de mar. (Salinidad aproximada 34.5% - pH 7.9-8.3).

Componente	**Cantidad**
Cloruro sódico	24,0 gr
Cloruro magnésico	5,0 gr
Sulfato magnésico	4,0 gr
Cloruro cálcico	1,1 gr
Cloruro potásico	0,7 gr
Bicarbonato sódico	0,2 gr
Bromuro sódico	0,096 gr
Ácido bórico	0,026 gr
Cloruro de estroncio	0,024 gr
Fluoruro sódico	0,003 gr
Agua destilada	1.000 ml

En el agua de mar, en su estado normal, se puede encontrar un amplio rango de concentraciones de sales disueltas, aunque siempre con una proporción constante de un constituyente a otro; las concentraciones son más bajas en las zonas frías o templadas que en las cálidas y resultan especialmente altas en zonas de aguas bajas con tasas excesivas de evaporación diurna **[17]**

Se puede apreciar en la tabla que las sales mayoritarias existentes en la composición del agua del mar y por tanto también en los áridos procedentes de dragado marino, son los cloruros, seguidos muy de lejos por los sulfatos.

Debido a la proximidad a zonas portuarias en las que se realizan las tareas de dragado, es necesario considerar un tipo de contaminación adicional, los metales pesados.

En Estados Unidos, estudios llevados a cabo sobre áridos dragados en distintos puertos, han concluido que presentan pequeñas concentraciones de metales pesados (Plomo, Cromo, Mercurio, Arsénico, Cadmio) así como también de PBC y Cianuro**[22].** Si las concentraciones de estas sustancias exceden los límites establecidos, es necesario su tratamiento.

2.2.6 Tratamientos de los áridos

El tratamiento de los áridos de dragado marino se define como el proceso llevado a cabo para reducir la proporción de sustancias contaminantes. Los contaminantes son separados de la arena, que queda relativamente limpia, y posteriormente son incinerados. Algunas técnicas de tratamiento de áridos se han desarrollado con éxito, sin embargo otras todavía están en proceso de desarrollo **[18].**

En primer lugar, es necesario someter los áridos a un pretratamiento **[19],** que reducirá la proporción de contaminantes. Posteriormente se requerirá un tratamiento o almacenamiento así como la mejora de la calidad física del material para su uso posterior.

El pre-tratamiento se realiza en dos fases: separación de las fracciones del material dragado que están relativamente limpias de las relativamente contaminadas y separación del el agua de los sólidos.

El pre-tratamiento se basa en el hecho de que los contaminantes se encuentran preferentemente adsorbidos en las partículas más finas. Las técnicas disponibles incluyen: las balsas de sedimentación, los hidrociclones y las membranas. En algunos casos, las partículas se lavan después de la separación para reducir aún más los niveles de contaminación.

Tras el pre-tratamiento, llega el momento de tratar los áridos. Las técnicas más usadas en la desintoxicación de los mismos, por haberse desarrollado con éxito, son: el tratamiento químico y el tratamiento por pulverización. **[22]**

- El tratamiento químico se basa en el comportamiento físico-químico de los áridos y los contaminantes, tales como: ajustes de pH, oxidación, intercambio iónico… consiste en provocar una serie de reacciones químicas complejas en las que se ven implicadas los metales pesados, como reactivos, de forma que pasan a formar parte de moléculas que resultan inofensivas en el hormigón. Las sustancias utilizadas para formar estas moléculas suelen ser ligantes a base de cationes metálicos con diferentes números de oxidación, como el Zinc y el Niquel. Los tratamientos químicos son bastante caros y lentos, lo que limita su uso.

- El tratamiento con pulverización consiste en separar las partículas finas de los áridos sometiéndolos a altas temperaturas que permitan el vencimiento de la fuerza hidrostática del agua. Tras repetir un proceso de mojado-secado varias veces, se ha comprobado que las partículas contaminantes también acaban por desprenderse. Este tratamiento es muy utilizado cuando los áridos estás severamente contaminados con materia orgánica, permitiendo su eliminación. Son tratamientos relativamente caros, pero alcanzan altos porcentajes de reducción de contaminantes.

En 2007, fue presentado por primera vez por F. Agostini et al. **[20]** un nuevo proceso llamado Novosol para el tratamiento de áridos contaminados. El proceso se basa en la estabilización de los metales pesados y en la eliminación de la materia orgánica térmicamente.

2.3 Propiedades de los materiales cementíceos

Existen diversas publicaciones a cerca de las propiedades que presentan los materiales cementíceos fabricados utilizando como arenas de sustitución aquellas provenientes de dragados marinos, tanto de la mezcla fresca como una vez endurecida. En este apartado analizaremos las conclusiones que se han obtenido algunos ellos.

En un estudio llevado a cabo por la Universidad Politécnica de Cataluña **[21]**, se evaluó la influencia de varias muestras de arena de dragado marino en pastas y morteros para su uso en construcción. Del estudio se observó lo siguiente:

- para la obtención de la misma consistencia, materiales cementíceos fabricados con sustituciones de arena de dragado marino requerían más cantidad de agua que aquellos que fueron hechos con arena natural, es decir, requerían el aumento de la relación agua/cemento.

- A medida que aumentaba el % de dragado marino en la mezcla, disminuía la fluidez de la misma.

- La adicción de arenas de dragado, no mejoraba la cohesión de la pasta, mientras que otras adicciones usadas en pastas con propiedades autocompactantes si que presentan esta característica.

- Morteros fabricados con el 25% de arena de dragado proporcionaban resistencias similares a los morteros de referencia (sin contenido de arena de dragado)

En la publicación de Agostini et al., 2007 **[20]**, también se presentó un estudio de la viabilidad de los áridos tratados en la fabricación de morteros. En el estudio se utilizaron áridos dragados del Puerto de Dunkirk, al norte de Francia. La caracterización física del material estudiado reveló una alta porosidad (60%) y absorción (45%) así como elevado contenido de finos. Se fabricaron tres moteros sustituyendo el 33%, el 66 % y el 100% de la arena procedente de cantera por arena de

dragado marino respectivamente Se observó un fuerte incremento de la retracción por secado (más de 10 veces mayor comparada con el mortero de referencia). La permeabilidad permaneció constante y la resistencia aumentó considerablemente para la sustitución baja y media mientras que con la probeta de sustitución 100% se consiguió una resistencia similar a la del mortero de referencia.

En un estudio llevado a cabo por la Universidad de Columbia **[22]** sobre morteros fabricados con sustituciones de arena natural por arena de dragado marino, se comprobó que las resistencias alcanzadas por aquellos que fueron fabricados con parte de áridos marinos tratados en su composición eran menores, sin embargo, el incremento de resistencia con el paso del tiempo (a 28 y 150 días) era superior que en los que solo contenían áridos naturales, tal y como se muestra en la tabla 6:

*Tabla 6.- Propiedades de morteros con material dragado con el paso del tiempo **[22]**.*

Dredged material content (Type, M% of cement)	0	Replacement, 20	Filler, 5	Filler, 10
Water-cement ratio	0.42	0.63	0.42	0.42
Superplasticizer	1.0%	2.0%	2.0%	3.0%
Flow	56 mm	48 mm	37 mm	28 mm
7d density	2.34 g/cm^3	1.93 g/cm^3	2.34 g/cm^3	2.32 g/cm^3
150d density	2.26 g/cm^3	1.95 g/cm^3	2.24 g/cm^3	2.24 g/cm^3
7d compressive strength*)	50.2 MPa	25.9 MPa	43.8 MPa	30.9 MPa
150d compressive strength*)	71.8 MPa	48.0 MPa	66.8 MPa	64.5 MPa
Increase	30%	46%	34%	52%

En el mismo estudio **[22]** se analizaron las diferencias entre hormigones fabricados con áridos sin tratar y hormigones fabricados con áridos tratados, lo que llevó a las siguientes conclusiones:

- A una relación agua/cemento constante la trabajabilidad del hormigón no tratado disminuye, pero su resistencia no presenta cambios significativos.

- Si a un hormigón con una relación agua/cemento baja le añadimos un superplastificante, aumentará su trabajabilidad, pero las resistencias conseguidas en los tratados serán superiores que en los no tratados.

Si se comparan ahora los hormigones fabricados con áridos marinos tratados con los fabricados con áridos procedentes de canteras naturales, se tiene que:

- Las resistencias alcanzadas por los hormigones formados por áridos marinos son menores, y las mezclas son menos trabajables.

- Si el cociente agua/diámetro medio del árido es menor a 0,55 la resistencia resulta altamente afectada, situación que se agrava cuando se utilizan

tratamientos de pulverización. Ello es debido a que la resistencia del hormigón, es directamente proporcional a la densidad de los áridos que lo forman (el tratamiento de áridos por pulverización provoca una disminución de la densidad de los mismos) y por tanto, si se utiliza un tratamiento químico, al aumentar la densidad del árido a causa de la formación de moléculas de mayor peso molecular, dicha disminución de resistencia respecto a la de hormigones fabricados con áridos naturales, es menos acusada. **[22]**

2.4 Durabilidad del hormigón

2.4.1 Patologías en morteros y hormigones

A continuación, se pasará a detallar las diversas patologías que puede sufrir el hormigón debido a la presencia de sales y otras sustancias en su composición, pero antes, se considera necesario conocer los componentes que forman el cemento, puesto que serán ellos los involucrados en las reacciones que tendrán lugar en el proceso degradación del hormigón.

Tras el proceso de sintetización que da origen al cemento, sus constituyentes básicos son: silicato tricálcico C3S, silicato dicálcico C2S, aluminato tricálcico C3A y ferroaluminato tetracálcico C4FA.

El cemento fragua y se endurece al ser mezclado con agua, debido a las reacciones químicas que se producen a partir de la interacción de sus componentes básicos. La hidratación del cemento es una reacción altamente exotérmica.

Dichos minerales, en contacto con el agua reaccionan dando los siguientes productos hidratados: Los silicatos cálcicos se transforman básicamente en silicatos cálcicos hidratados CSH e hidróxido de calcio CH (también conocido como portlandita), el aluminato tricálcico y el ferroaluminato tetracálcico forman Aft (etringuita primaria) y Afm (monosulfato).

El gel CSH es el principal responsable de la resistencia mecánica de la pasta y el CH del elevado valor del pH, contribuyendo a crear un medio alcalino (pH alrededor de 13) que actúa como protector de las armaduras frente a la corrosión.

Durante el proceso de fraguado se produce un cambio de un sistema de copos hacia un sistema de esqueleto viscoelástico capaz de resistir tensiones **[23].**

Una vez definidos los componentes del cemento, pasaremos a estudiar los diversos ataques que las sustancias que incluyen los áridos finos provenientes de dragado marino, concretamente sales y conchas, pueden tener sobre el hormigón.

Cabe destacar que no se han encontrado publicaciones referentes a la durabilidad de morteros u hormigones fabricados con materiales procedentes de dragados marinos. Si bien no tenemos unas referencias de la durabilidad de estos materiales a largo plazo, si

que tenemos numerosos ejemplos de estructuras fabricadas con dichos materiales en otros países y que desempeñan su función sin problemas, como veremos posteriormente en el apartado de aplicaciones.

Respecto al contenido de conchas, se debe decir que los huecos que hipotéticamente crean en la pasta, harían aumentar la porosidad y por tanto la permeabilidad del hormigón, influyendo de forma determinante en las agresiones que los diferentes agentes provocan sobre el mismo, tales como carbonatación, ataque por cloruros, sulfatos o magnesio. Más tarde hablaremos sobre la veracidad que algunos autores otorgan a esta afirmación. Esto, unido a la presencia de sales que los áridos de dragado marino incorporarían a la mezcla, resultaría muy perjudicial puesto que se favorecería aún más el desarrollo de las diversas patologías.

2.4.1.1 Carbonatación

La carbonatación se produce debido a la penetración de moléculas de CO2 a través de los poros del hormigón. Una vez en el interior, el CO2 reacciona con las moléculas de portlandita CA(OH)2, de lo que obtenemos como resultado carbonato cálcico (CACO3). Por una parte, el carbonato cálcico tiene un efecto positivo, en cuanto que se trata de un precipitado que puede taponar los poros impidiendo que entren agentes agresivos en ellos, pero por otra, la reacción provoca una disminución considerable del pH a causa de la disminución de la portlandita, que es la responsable del mismo. Teniendo en cuenta que inicialmente el pH es de 12,5-13, tras producirse la carbonatación se puede alcanzar un pH de 8-9 Se trata de una reacción expansiva, en la que la molécula aumenta de volumen, lo que crea unas tensiones externas que provocan que se descame la película de óxido protectora de las armaduras de hormigón, favoreciéndose de este modo la corrosión del hormigón por factores externos (O2 y H2O) **[24]**.

2.4.1.2 Ataque por cloruros

La corrosión del acero en hormigones armados, se origina por la presencia de oxígeno (O2) y humedad (H2O), pero la existencia de cloruros libres en el medio es un desencadenante del proceso. Los cloruros combinados están íntimamente asociados al cemento hidratado y no son solubles en agua, por lo que no causan corrosión.

Los hormigones presentan inicialmente un pH altamente alcalino (12,5-13). Los agentes externos (H2O, O2) atacan el acero presente en el hormigón armado, penetrando hasta él a causa de los poros presentes en el hormigón. Como consecuencia, el acero se oxida superficialmente formándose una capa de unas pocas micras que actúa a sí mismo como protección, impidiendo que el H2O y O2 continúen avanzando hacia el interior (capa de pasivación).

Sin embargo, como ya se ha visto, la carbonatación provoca una disminución del pH y el ataque por cloruros desprotege de forma localizada al acero de la película de óxido que lo recubre (despasivación). Esto tiene lugar en cuanto que el ión cloruro Cl- al

reaccionar con el óxido de hierro forma cloruros de hierro, que son muy inestables y se disgregan, traduciéndose el proceso en una pérdida efectiva de material.

Eliminada en parte la película protectora del acero, el H2O y el O2 tienen vía libre para continuar hacia el interior del mismo y proseguir con la corrosión del material **[24]**.

Cabe destacar que, en opinión de diversos autores, la corrosión puede iniciarse por la acción de iones de cloruro sobre el acero de refuerzo aún en ambientes con un pH superior a 10 u 11. En estos casos se relacionan con cloruros presentes de origen en la mezcla por efectos de los áridos, el agua o los aditivos, pues los que penetran del exterior están generalmente asociados con el proceso de carbonatación, el cual incide inmediatamente sobre los niveles de pH en el hormigón.**[25]**

En nuestro trabajo, solo utilizaremos hormigones en masa, y por tanto, el efecto de los cloruros sobre las armaduras no es objeto de estudio. Sin embargo, los cloruros no actúan únicamente sobre las armaduras, sino también sobre la mezcla de hormigón endurecido. En este caso, entran en juego los cloruros combinados. Cuando el cloruro cálcico (CaCl2) reacciona con la portlandita o hidróxido de calcio (Ca(OH)2) se produce un compuesto expansivo que puede producir roturas debidas a la presión ejercida en los poros del hormigón.

2.4.1.3 Ataque por sulfatos

Los sulfatos presentes en el agua marina reaccionan con la portlandita CA(OH) para formar sulfato de calcio dihidrato (yeso). Una vez más, la cristalización del nuevo componente ejerce una presión en los poros que puede llegar a fisurar el hormigón y deteriora la adherencia del cemento y el árido. El aluminato de calcio hidratado, C_4AH_{13} obtenido a partir del C_3A al reaccionar con la portlandita en el proceso de hidratación del cemento, reacciona con el yeso para formar ettringita secundaria, compuesto muy expansivo de un volumen molar muy elevado que provoca la disgregación del hormigón. Además, la ettringita secundaria se puede formar a cualquier temperatura. En cambio, la ettringita "primaria" se forma durante el fraguado (fase "plástica" de la pasta) y no es perjudicial.

Otro problema a tener en cuenta es la consecuencia de la reacción del yeso con el gel CSH y el carbonato de calcio CaCO3 obtenido durante la carbonatación, lo que da como resultado un compuesto todavía más expansivo denominado taumasita. La taumasita se produce a una temperatura de entre 5 y 10 ºC.

En presencia de iones sulfato (SO42-), hay más concentración de iones cloruro (Cl-) (cloruros libres). Ello se debe a que ambos reaccionan con los aluminatos hidratados, sin embargo, la reacción con los sulfatos es más favorable y por tanto, reaccionarán antes con ellos que con los cloruros. Por tanto, el efecto de corrosión por cloruros en las armaduras es más grande siempre que existan sulfatos **[24]**.

2.4.1.4 Ataque por magnesio

La reacción del magnesio del agua del mar con la portlandita da hidróxido de magnesio $Mg(OH)_2$. Compuesto que una vez más provoca presiones en los poros así como la posible fisuración del hormigón y la pérdida de adherencia del conjunto árido-pasta.

Por otra parte, al reaccionar el magnesio con el gel CSH se produce una considerable reducción de la resistencia mecánica, ya que el gel CSH es el principal responsable de dicha resistencia **[24]**.

2.4.1.4 Reacciones Álcali-áridos

Otro de los principales problemas que puede presentar el hormigón, es el derivado de las reacciones álcali-áridos o álcali-silicato (ASR, Alcali-Silica Reaction). Las reacción de la portlandita, principal contribuyente del elevado pH del hormigón, con las diversas sustancias de origen silicio presentes en los áridos, da lugar a compuestos expansivos que generan tensiones y pueden llegar a fisurar el hormigón contribuyendo también al aumento de su permeabilidad y por tanto a un ataque mayor de agentes químicos **[22].**.

Tanto los ataques por cloruros como por sulfatos y magnesio, tienen especial relevancia en ambientes marinos, donde resulta muy importante tener en cuenta fenómenos como la succión capilar y la evaporación, particularmente en las zonas que se encuentran expuestas al oleaje, y por tanto sometidas a ciclos de inmersión – emersión.

En el caso de hormigones en masa, que es el que nos ocupa, los cloruros no corroerán ninguna armadura y por tanto, la presencia de iones cloruro hace que la expansión producida debida a los sulfatos sea menor a la esperada, al reaccionar los cloruros también con los aluminatos hidratados generados a partir de la presencia de C_3A, sin embargo, ya hemos visto que los cloruros combinados también ocasionan problemas de expansión al reaccionar con el hidróxido de calcio.

Por tanto, manteniendo el contenido de aluminatos por debajo de cierto límite en un hormigón de ambiente marino, la cristalización de compuestos expansivos debería ser menor de lo que sería en un hormigón expuesto a agua dulce (donde la presencia de iones cloruro no sería tan elevada).

S. M. Abdelkader **[26]** recomienda en su estudio la utilización de cementos con bajo contenido en aluminatos (sulforresistentes), la utilización de hasta un 10% en contenido de C_3A ha resultado ser satisfactoria siempre que la permeabilidad del hormigón no sea elevada o de lo contrario, utilizar cementos con adiciones minerales, cenizas volantes y humo de sílice principalmente. El objetivo principal de esta elección es intentar minimizar en lo posible las reacciones expansivas entre los iones del medio agresivo y la matriz de cemento. Sin embargo la protección más efectiva sería sin duda la que impida la penetración de los agresivos. La entrada de cualquier agresivo en el hormigón viene determinada por la estructura porosa del mismo, y muy especialmente por la porosidad accesible conectada. Esta porosidad queda definida por la dosificación del hormigón y las características químicas del cemento. Los resultados obtenidos en el estudio muestran claramente que los hormigones con humo de sílice son

significativamente menos porosos y menos permeables. En el resto de dosificaciones estudiadas la porosidad es mayor, y es el radio de poro el factor que se presenta como más determinante para definir la permeabilidad del material.

En hormigones en masa, una baja permeabilidad se hace necesaria para minimizar y retrasar el efecto del ataque por sulfatos. Dicha permeabilidad se consigue utilizando hormigones con baja relación a/c, preferentemente por debajo de 0,40. Sin embargo, este no es el único factor influyente en la permeabilidad (un hormigón con relación a/c baja y con pocos finos puede ser altamente permeable), por tanto también resulta necesario que el hormigón sea compactado y curado correctamente, siendo la dosificación elegida la adecuada.

2.4.2 Expecificaciones de áridos y hormigones en pavimientos portuarios

Los áridos a emplear en la fabricación de morteros y hormigones para pavimentos portuarios deberán cumplir las especificaciones pertinentes.

La designación de los hormigones que nos ocupa será IIIa, IIIb o IIIc, por tratarse de hormigones situados en zona marina (aérea, sumergida o en zona de mareas respectivamente). Según la EHE **[27]**, para los ambientes considerados y áridos finos, ya sean redondeados o no calizos procedentes de machaqueo, la cantidad de finos que pasan por el tamiz 0,063mm no debe superar el 6%, mientras que para áridos de origen calizo no debe superar el 10%.

Dichas limitaciones se fijan como precaución frente a la posibilidad de que con la fracción fina se agreguen sustancias indeseables en la pasta de morteros y hormigones. No obstante, hemos visto que se han llevado a cabo varias investigaciones en las que las adicciones de árido de tamaño limo (pasa por el tamiz 0,063) eran las principales, y en las que se plantea que la presencia de dichos áridos en sí misma no es perjudicial para el hormigón. Dichos estudios demuestran que la durabilidad del hormigón puede no verse afectada por el exceso de finos, si éstos son bien controlados y el diseño de la mezclas es correcto, y desde luego si su efecto cohesionante no se compensa con la adición descontrolada de agua **[28], [14], [12]**.

La selección de dosificaciones para las mezclas, no está regulada por ninguna norma a pesar de que la literatura existente sobre el tema es muy extensa. No obstante, podemos tomar como referencia las denominadas curvas granulométricas "óptimas" que se definen con la intención de generar mezclas de densidad máxima, permitiendo conseguir hormigones con menor necesidad de pasta (agua y cemento), y por tanto más económicos.

A estas curvas "óptimas" se les añaden otros condicionantes que las modifican con objeto de adecuarse a las necesidades específicas que requiere cada construcción y garantizar la correcta puesta en obra, sin riesgos como la segregación, que a menudo se compensa aumentando el contenido de finos **[29]**.

Como curvas "optimas" podemos destacar aquellas que se basan en la fijación del contenido de cemento por m^3, como son Fuller, Bolomey o Faury. Las dos últimas

tienen en cuenta además la consistencia deseada o la aplicación que se hará del hormigón.

En particular, la figura 11 muestra varias curvas granulométricas fijadas teniendo en consideración los efectos producidos por diversidad de factores para un tamaño máximo de árido de 20mm. La curva de Fuller se situaría aproximadamente entre las curvas A y B.

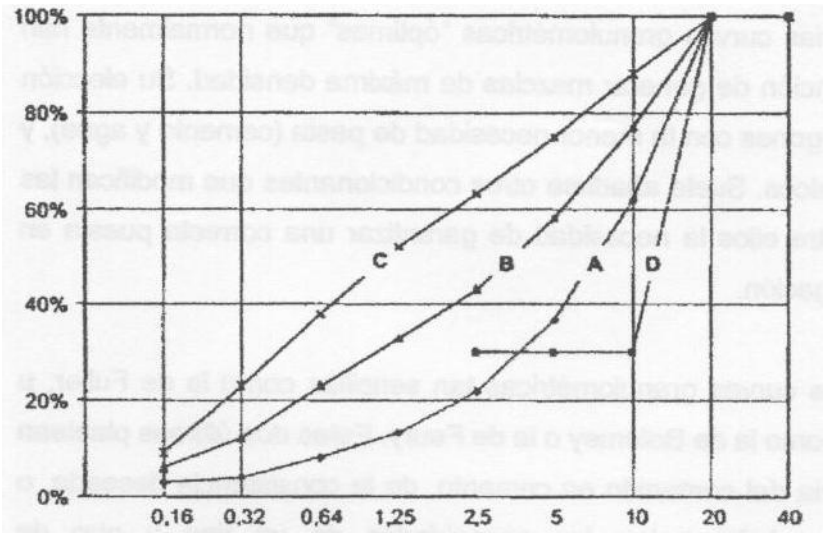


*Figura 11-. Curvas granulométricas recomendadas para tamaño máx. de árido 20mm **[29]**.*

En cuanto a las sustancias que, excediendo determinadas cantidades pueden resultar perjudiciales tanto en áridos como en los morteros y hormigones de los que formarán parte, se dan las siguientes especificaciones:

La tabla 7 muestra los límites máximos para sustancias consideradas nocivas para el hormigón establecidos en la Instrucción del Hormigón Estructural (EHE):

*Tabla 7.- Limitaciones de las sustancias perjudiciales**[27]**.*

Sustancias Perjudiciales		**Arido fino**	**Arido grueso**
Terrones de arcilla, UNE 7133:58		1,00	0,25
Partículas blandas, UNE 7134:58		-	5,00
Material retenido por el tamiz 0,063 UNE EN 933-2:96 y que flota en un líquido de peso específico 2, UNE 7244:71		0,50	1,00
Compuestos totales de azufre expresados en S03 y referidos al árido seco, UNE EN 1744-1:99		1,00	1,00
Sulfatos solubles en ácidos, expresados en S03 y referidos al árido seco, UNE EN 1744-1:98		0,80	0,80
Cloruros expresados en Cl y referidos al árido seco UNE EN 1744-1:98	Hormigón armado/ masa con armadura para reducir fisuración	0,05	0,05
	Hormigón pretensado	0,03	0,03

Por otro lado, en el British Standards Institution (BSI), **[30]** también se nos dan especificaciones que deben cumplirse con objeto de evitar situaciones indeseables en el hormigón, garantizando su impermeablidad y evitando la entrada de sustancias como cloruros, sulfatos o CO2.

En la tabla 8, se muestran los límites máximos para cloruros en varios tipos de hormigones definidos por el BSI:

*Tabla 8.- Límites según el BSI para ión cloruro **[15]**.*

Tipo de hormigón	**Límite obligatorio para hormigones según BS 8110:1985**	**Límite guía para áridos según BS 882:1983**
Hormigón pretensado / con armadura embebida.	0,1	0,02
Hormigones con cemento Portland sulfatoresistente.	0,2	0,04
Hormigones con cemento Portland con excepción de los SRPC	0,4	0.06 para el 95% de resultados de la prueba

Seguidamente (tabla 9) se muestra el porcentaje respecto al peso de cemento del contenido de cloruros máximo que puede presentar el hormigón una vez determinado el ión cloruro máximo presente en el árido:

*Tabla 9.- Contenido de cloruros en hormigones con áridos marinos **[15]**.*

Grado del hormigón		**C30**	**C35**	**C40**	**C45**	**C50**
Contenido mínimo de cemento (Kg/m^3)		275	300	325	350	375
Cociente máximo asumido agregado/cemento		6.9	6.3	5.7	5.3	4.5
		Ión cloruro máximo en el hormigón				
Ión cloruro en el árido	0.06	0.46	0.43	0.39	0.37	0.32
	0.05	0.40	0.37	0.34	0.32	0.28
	0.04	0.33	0.30	0.28	0.26	0.23
	0.03	0.26	0.24	0.22	0.21	0.19
	0.02	0.19	0.18	0.17	0.16	0.14
	0.01		0.11	0.11	0.10	0.10

El porcentaje de ión cloruro en el cemento Portland ordinario se estima entre 0,01 y 0,05%.

Debemos tener en cuenta que los cloruros combinados están íntimamente asociados al cemento hidratado y no son solubles en agua, por lo que no causan corrosión, aunque pueden producir expansión al reaccionar con la portlandita. Por tanto, a efectos de corrosión, los límites en las especificaciones deberían aplicarse al contenido de cloruros

libres en lugar de al contenido total o soluble en ácido. No obstante, con los datos de las actuales investigaciones no es posible calcular con precisión su proporción en relación con el contenido total de cloruros **[17]**. Nosotros, en este estudio, no trabajamos con hormigones armados ni pretensados y por tanto, nos interesan básicamente los cloruros combinados en cuanto que pueden provocar tensiones internas y fisuración de los moteros y hormigones en masa.

Por otro lado, ya hemos visto que la EHE **[27]**, establece que el contenido en cloruros solubles de los áridos para hormigones en masa que lleven armadura para reducir fisuración no debe sobrepasar el 0,05%.

En cuanto al contenido de sulfatos, se puede considerar como orientación, que valores superiores del 0,5 o 0,7%, expresados en SO3 respecto al peso del hormigón pueden ser el origen de posibles lesiones. Por otro lado, ya hemos visto que la EHE **[27]**, establece que el contenido en SO3 de los áridos no debe de superar el 0.8% en peso de los mismos.

No tenemos en los limites BS indicaciones para el contenido de conchas en las arenas, sin embargo, para gravas de dimensiones 5-10mm se fija un 20% en peso del árido, y un 8% si las dimensiones superan los 10mm.

En 1968 el "Greater London Council" (GLC) publicó una normativa sobre agregados marinos que limitaba la cantidad permitida de conchas en áridos utilizados en fabricación de hormigones. Dicha fijación de límites se basaba fundamentalmente en el hipotético aumento de la permeabilidad debido a los huecos que dejaban las conchas. Sin embargo, un programa de investigación llevado a cabo por G.P. Chapman y A.R Roeder **[31]** concluyó que una cantidad de conchas incluso muy por encima del doble de la que se había establecido en los límites por el GLC podía ser usada en hormigones manteniéndose todas las propiedades requeridas. Mediante el estudio, se puso de manifiesto que los huecos de las conchas no eran tales en cuanto que en una buena parte eran rellenados con mortero, y por tanto no se producían tales efectos nocivos sobre la permeabilidad. El hecho de que las conchas estén formadas fundamentalmente por carbonato cálcico CaCO3 tampoco suponía un problema, ya que este es químicamente estable en el hormigón **[15].**

En cuanto al problema que presentan las reacciones álcali-áridos, si partimos de que los áridos naturales obtenidos de canteras y los áridos marinos son petrológicamente similares, los segundos no tienen por qué ser más o menos susceptibles a las reacciones álcali-áridos. La posible contribución que los áridos pueden hacer respecto a reactivos alcalinos, es estrictamente controlada en ambos. En áridos lavados dicha contribución es relativamente pequeña pero es necesario tomarla siempre en cuenta y cumplir las especificaciones para limitar los posibles efectos **[32].**

La Concrete Society Working Party define las siguientes indicaciones a tener en cuenta con objeto de limitar las reacciones expansivas álcali-silicato **[33]:**

- Limitar los reactivos alcalinos al 0.6% (NaO_2) respecto al cemento
- Limitar los reactivos alcalinos a 3Kg/m^3 (NaO_2) respecto al hormigón

- No superar el 1,1% de ácidos alcalinos solubles contenidos en los áridos.

Por último, para gestionar el material procedente dragados portuarios, el CEDEX (Centro de estudios y experimentación de las Obras Públicas), propone unas recomendaciones **[19], [33]** basadas en diversos análisis que determinan la cantidad de sustancias contaminantes presentes. Los áridos de dragado se clasifican en tres categorías separadas por dos niveles de acción atendiendo a los resultados de dichos análisis:

- Categoría I: materiales cuyos efectos químicos sobre flora y fauna marinos son insignificantes o nulos. Pueden ser vertidos al mar considerando solo efectos mecánicos. Concentración de contaminantes < Nivel de acción 1

- Categoría II: materiales con concentraciones moderadas de contaminantes. Se pueden verter al mar de forma controlada. Nivel de acción 1 < Concentración de contaminantes< Nivel de acción 2.

- Categoría III: materiales con concentraciones elevadas de contaminantes. Deben ser aislados de las aguas marinas o sometidos a tratamientos adecuados. Concentración de contaminantes > nivel de acción 2. En función del grado de contaminación se establecen dos subcategorías:

    - IIIa, pueden utilizarse técnicas de gestión de aislamiento blando (confinamiento subacuático) o vertido en recintos en zonas intermareales).

    - IIIb, deben utilizarse técnicas de gestión de aislamiento duro (vertido en recintos con paredes impermeables, evitando la fuga de lixiviados).

Para definir las categorías anteriores, se establecen los siguientes niveles de acción:

Tabla 10.- Valores de contaminantes que determinan los niveles de acción (mg/kg peso seco) ***[19], [33]***

	Nivel de Acción I	**Nivel de Acción II**
Mercurio	0,6	3
Cadmio	1	5
Plomo	120	600
Cobre	100	400
Zinc	500	3000
Cromo	200	1000
Arsénico	80	200
Niquel	100	400
Pesticidas	0,03	0,1
PAHs		
Borneff	1	3
Σ16 PAHs	2	6
Σ7 PCBs	0,03	0,1

2.5 Aplicaciones

Como hemos visto, las principales aplicaciones de los áridos de dragado marino hoy en día son el relleno de las playas, la defensa de costas y la recuperación de tierras. Los Países Bajos, pioneros en el uso de áridos marinos, utilizan gran parte de su producción para estos fines.

A pesar que por ahora en España el uso de áridos marinos en construcción no está permitido salvo en unas pocas excepciones, en otros países se han estudiado más sus aplicaciones, e incluso se han llegado a construir grandes infraestructuras utilizando este tipo de áridos. Así pues, cada vez son más los países que apuestan por la utilización de áridos marinos en construcciones civiles, como el caso del Reino Unido, Dinamarca o Finlandia, donde importantes cantidades de los mismos son requeridas para proyectos específicos **[7]**. En diversos tipos de obra se requieren rellenos con tierra, como puede ser el trasdosado de muelles, en bases de carreteras, en aeropuertos, o bien la sustitución de terrenos de mala calidad, para mejorar las condiciones geotécnicas en cimentaciones de muelles o de cualquier otro tipo de estructura **[4]**.

A continuación se enunciarán a modo de ejemplo algunas de las obras más significativas llevadas a cabo en las que interviene material de dragado marino **[7]**:

En los Países Bajos, la propuesta de ampliación del puerto de Rotterdam tiene un requisito previsto de aproximadamente 100 millones de metros cúbicos de arena marina por año durante tres años, que será utilizado como relleno a granel para su recuperación.

Figura 12.- Vista ampliación del Puerto de Rotterdam

En Dinamarca, diversas actividades constructivas se han llevado a cabo en la costa utilizando áridos marinos, como es el caso del proyecto del túnel y del puente Great Belt, que une Dinamarca y Suecia, además de obras de expansión en el puerto de Aarhus. Entre 2003 y 2004, se dragaron un total de 1 millón de metros cúbicos para la construcción de una playa artificial próxima a la isla de Amager en Copenhague.

Figura 13.- Vista del Great Belt Bridge, que une Dinamarca y Suecia.

En Finlandia se extrajeron en 2006 más de 2 millones de metros cúbicos de árido marino para la construcción del nuevo puerto de Helsinki.

En Suecia, a pesar de que desde 1998 no se permiten actividades de extracción de áridos marinos, se consintió el dragado de 2,5 millones de metros cúbicos de áridos con objeto de la ejecución de los nuevos tramos del canal de Flint, entra la isla de Saltholm y la costa de Scania en conexión con la obra de Oresund Link, entre Suecia y Dinamarca. La totalidad del material dragado fue utilizado para la construcción de islas artificiales al sur de la isla de Saltholm.

En el Reino Unido, algunas obras de gran importancia se han construido con áridos marinos, entre las que destacan el Thames Barrier, el National Theatre, el puente QE2, El Canary Wharf y el Channel Tunnel Rail Link. Otro ejemplo es el Mill Hill Bridge, un puente en arco de hormigón reforzado de 57 metros construido en Sussex en los años 70, y el Tamar Bridge en Plymouth. También se han usado este tipo de hormigones en diversos pavimentos viarios con éxito**[35]**.

Figura 14.- Vista de la Thames Barrier. Thames River, London.

Figura 15.-. Vista Tamar Bridge, Plymouth.

Figura 16.- Vista del National Theatre, London.

Tanto en Francia como en Estados Unidos se han utilizado grandes volúmenes de tierra para la construcción de pavimentos y se está estudiando el potencial uso de estos sedimentos para la construcción de terraplenes de carreteras. En Estados Unidos, se construyeron dos terraplenes con material de dragado estabilizado utilizando 8.0000 yardas cúbicas en un área comercial situada al lado del puerto de Nueva York/ Nueva Jersey, el mayor de la costa este de los EUA. Se evaluaron las propiedades geotécnicas de los materiales durante la construcción y a lo largo del año siguiente. Los resultados mostraron que el material satisfacía la mayoría de los criterios geotécnicos para las actividades de relleno constructivo a excepción de los criterios de durabilidad, por ello, se requirió una cobertura apropiada y una protección similar a las de rellenos constructivos con suelos cohesivos. Los resultados del estudio medioambiental han puesto de manifiesto que no se han verificado daños a corto plazo causados por el uso de este material, sin embargo, debido a la variabilidad de la contaminación de sedimentos en dicho puerto sumada a la variabilidad de las condiciones locales

alrededor del estado, resulta imposible la recomendación generalizada de este material en aplicaciones de carreteras **[36]**.

En Australia, la construcción de la carretera paralela al aeropuerto de Sydney reclamó unas 170 ha de la Botany Bay utilizando aproximadamente 15 millones de metros cúbicos de arena dragada de esta bahía **[37]**.

En Hong-Kong se construyó la isla artificial de Chek Lap Kok con áridos de dragado marino para albergar el aeropuerto **[4]**.

Figura 17.- Isla artificial Chek Lap Kok, Hong-Kong.

Otro ejemplo de grandes superestructuras fabricadas fundamentalmente mediante áridos de dragado marino son las Islas Palmera de Dubai (Palm Jumeirah, Palm Jebel Ali Palm Deira). Las 2 primeras requirieron un volumen de 100 millones de metro cúbicos de arena cada una para su construcción, mientras que la tercera, mucho más grande, un volumen que se prevé 10 veces mayor, puesto que todavía se encuentra en construcción. Así mismo en Dubai se construyó un archipiélago artificial de más de 300 islas simulando la forma del mundo llamado The World entre las islas Palm Jumeirah y Palm Deira. Para la construcción de todas ellas han sido necesarias cantidades ingentes de arenas y rocas calizas extraídas del fondo del Golfo Pérsico.

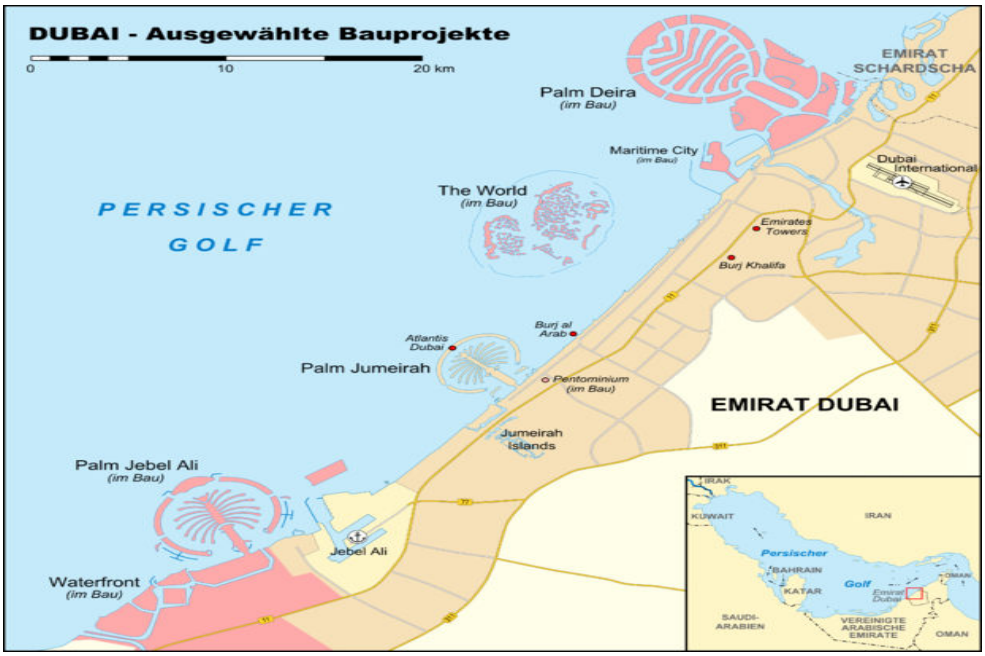


Figura 18.- Esquema de las Palm Islands y The World, Dubai ***[38]***.

Por último analizaremos el caso de España en más detalle, donde la utilización de los materiales de dragado marino como material constructivo se encuentra actualmente muy limitado por las normativas reguladoras. La gestión del material de dragado abarca diversos campos que se describen a continuación**[39]**.

Usos en Obras Públicas:

- Creación de tierra firme y mejora de terrenos.
- Rellenos, sustituciones y recubrimientos.
- Regeneración y creación de playas.
- Trasvases.
- Construcción de bermas sumergidas.
- Construcción de diques y presas de tierra. Trasdosado de muelles. Relleno de explanadas.
- Relleno de dársenas y canales en desuso.
- Empleo como materiales de construcción.

Usos en Agricultura y Pesca:

- Creación y mejora de tierra vegetal.
- Acuicultura.
- Mejora de recursos pesqueros.
-

Usos en Medio Ambiente:

- Regeneración y creación de zonas húmedas.
- Creación de islas de nidificación.
- Recubrimiento de fondos contaminados.

2.6. Conclusiones

A la vista de todo lo mencionado anteriormente en este capítulo, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Se han desarrollado numerosos y sofisticados equipos de dragado y técnicas de extracción, debido a que resultan esenciales para el mantenimiento de calados y realización de obras marinas.

- Los volúmenes de extracción de áridos en España son muy pequeños en comparación con los de la mayoría de países europeos extractores de áridos, siendo además el único país que dedica el 100% de las extracciones al relleno de playas. En el resto de países, cantidades variables de estos áridos han sido utilizadas en proyectos específicos de construcción civil.

- Diversos estudios llevados a cabo con arenas marinas revelan que son de naturaleza muy fina. La mayor parte de ellos pasan por el tamiz 0,125 adquiriendo la nomenclatura de finos.

- El origen geológico de los áridos marinos es similar a los de cantera. Las principales reside en la presencia de sales, conchas y materia orgánica en los primeros. Aunque debido a que son extraídos en las proximidades de zonas portuarias, es necesario considerar la contaminación por metales pesados y tratarlos en caso de que sea necesario.

- De los diferentes estudios llevados a cabo con arenas de dragado marino para fabricación de morteros y hormigones, se deduce que requieren más cantidad de agua que los convencionales para la obtención de la misma consistencia, que aumentan la retracción por secado y que las evoluciones de las resistencias son mayores. Sin embargo, las investigaciones realizadas hasta la fechas son heterogéneas en lo que concierne a las propiedades mecánicas.

- Los morteros y hormigones utilizados en ambientes marinos están más expuestos que en condiciones normales a toda una serie de ataques químicos. Esta situación se ve agravada al utilizar en su composición parte de arenas marinas que pueden incorporar sustancias nocivas para el hormigón (sulfatos, cloruros…) por ello, es necesario que se cumplan las especificaciones técnicas que garanticen su durabilidad.

- No se han encontrado estudios de durabilidad de morteros u hormigones fabricados con parte de arenas de dragado marino, sin embargo, en otros países, son numerosos los ejemplos de infraestructuras fabricadas con dichos materiales que desempeñan su función sin problemas.

CAPITULO III

MATERIALES Y FABRICACION

3.1 Introducción

En el presente capítulo se describirán las propiedades de los materiales utilizados para la fabricación de los diferentes morteros y hormigones objeto de estudio: cemento, áridos naturales y áridos de dragado marino, así como el proceso de fabricación que comprende desde la elección de la dosificación hasta el curado de las probetas.

Se fabricó en primer lugar un mortero y un hormigón patrón a partir del cual se fueron sustituyendo diferentes proporciones de arena natural por arena de dragado marino con objeto de valorar las distintas propiedades respecto a dichas muestras patrón. Las fracciones de grava y gravilla utilizadas durante toda la investigación, han sido las procedentes de canteras naturales.

3.2 Materiales

La fase experimental llevada a cabo en el laboratorio comenzó con la determinación de las propiedades mineralógicas, químicas y físicas de los materiales a utilizar. Tras ello, se procedió a la elección de las dosificaciones que se consideraron adecuadas para los morteros y hormigones a fabricar y posteriormente, se fabricaron las probetas de cada uno de los tipos que serían ensayadas para dotar a los mismos de una caracterización mecánica atendiendo a los resultados de los ensayos.

3.2.1 Propiedades del cemento

El cemento utilizado fue CEM II/A-L 42,5R, de rápido endurecimiento, con una densidad de 3,05 g/cm^3. Sus características físicas, químicas y mecánicas más relevantes, según la norma UNE-EN 197-1:2000, se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 11.- Características del CEM II/A-L 42,5 R y valores habituales

Características del cemento	Norma	Valores habituales
Clínker	80 – 94 %	88%
Calcárea	6 – 20 %	10%
Componentes minoritarios	0 – 5 %	2%
Presencia de cloruros	≤ 0,10 %	0.01%
Presencia de sulfatos	≤ 4 %	3.30%
Inici de fraguado	≥ 60 min	120 min
Final de fraguado	≤ 720 min	180 min
Expansión	≤ 10 mm	0.5 mm
Resistencia a 2 dias	≥ 20 MPa	25 MPa
Resistencia a 28 dies	42.5 MPa ≤ R ≤ 62.5 MPa	52 MPa

3.2.2 Propiedades de los áridos naturales

Los áridos utilizados en la fabricación de morteros y hormigones, han sido arena natural (0/5), gravilla (5/12) y la grava (12/20) procedentes de cantera. Todos ellos de origen calizo.

En cuanto a las propiedades químicas, el proveedor garantiza que se cumplen las especificaciones necesarias para utilizar estos áridos procedentes de cantera en la fabricación de morteros y hormigones.

Para la determinación de las propiedades físicas, se realizaron una serie de ensayos sobre los áridos: granulometría, densidad, absorción, equivalente de arena, coeficiente de forma y desgaste de Los Ángeles, que se describen a continuación:

La granulometría por tamizado de los áridos se determinó de acuerdo con la norma UNE EN 933-2:1996 (ver figura 19).

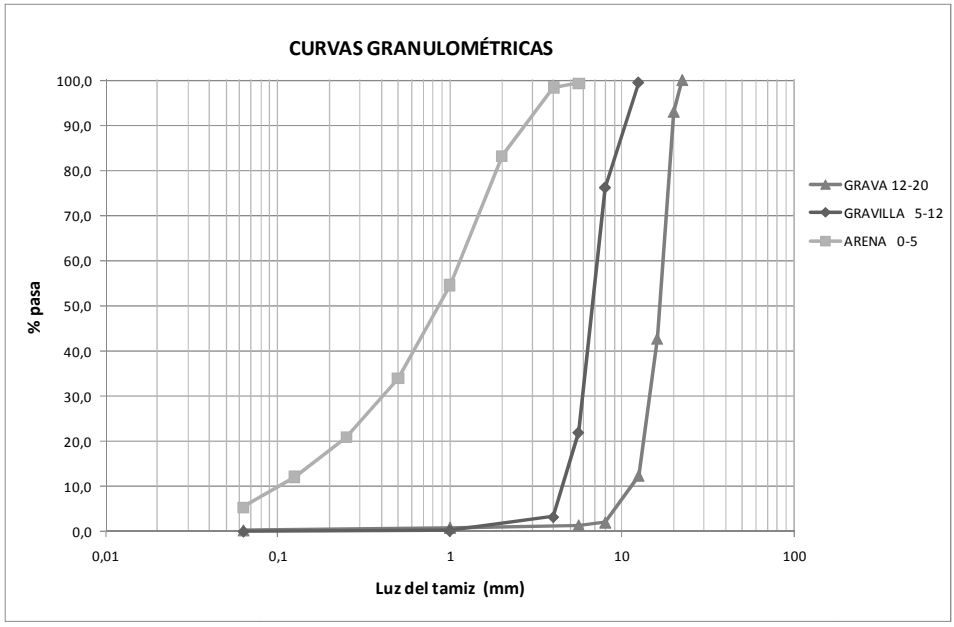


Figura 19.- Granulometría de los áridos naturales

Las densidades y absorciones de agua fueron determinadas para cada una de las fracciones de áridos utilizadas de acuerdo a la norma prEN 1097-6:2000. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 12.- Propiedades de los áridos naturales

	Grava	**Gravilla**	**Arena**
	12/20mm	**5/12mm**	**0/5mm**
Densidad aparente (g/cm^3)	2.6	2.69	2.78
Densidad seca (g/cm^3)	2.61	2.61	264
Densidad seca saturada(g/cm^3)	2.63	2.64	2.69
Absorción (%)	1.2	0.85	1.9

Cada uno de los ensayos, se realizó varias veces con objeto de valorar la posible dispersión de resultados, la cual fue muy pequeña, por lo que se halló la media aritmética de las repeticiones realizadas.

La densidad aparente hace referencia a la relación entre la masa de una muestra de arena seca en estufa a 100ºC durante 24 horas y el volumen que ésta ocupa dentro del agua incluyéndose vacíos internos y excluyendo vacíos de agua accesibles.

La densidad seca es la relación entre la masa de la muestra de arena seca en estufa a 100ºC durante 24 horas y el volumen que ésta ocupa dentro del agua incluyéndose vacíos internos y externos de agua accesible.

La densidad seca saturada se refiere a la relación entre la masa de una muestra de arena saturada pero con la superficie seca y el volumen que este conjunto ocupa en el agua, incluyéndose ambos vacíos internos y externos de agua accesible.

La EHE **[27]** fija que la absorción máxima por parte de los áridos no puede ser inferior al 5%, lo que como vemos, se cumple en todos los casos.

El equivalente de arena se determino de acuerdo con la norma UNE 83.131:90, obteniéndose un valor visual de 81, siendo este superior al mínimo requerido por la EHE **[27]**.

El ensayo de equivalente de arena, se fundamenta en liberar de la muestra a ensayar los posibles recubrimientos de arcilla adheridos a las partículas de arena mediante la adicción de una solución coagulante que favorece la suspensión de las partículas finas sobre la arena, determinando su contenido respecto de las partículas de mayor tamaño.
El coeficiente de forma del árido grueso fue determinado con arreglo al método de ensayo indicado en la UNE 7.238:71. Vemos los resultados en la tabla siguiente:

Tabla 13.- Coeficiente de forma de los áridos gruesos

	Grava	**Gravilla**
	12/20 mm	**5/12 mm**
Coef. Forma	0.30	0.21

Dicho ensayo consiste en clasificar las partículas de una muestra de árido según la relación entre su dimensión máxima y mínima, empleando un pie de rey si es necesario. Según la EHE **[27]** el coeficiente de forma no debe ser inferior a 0,15, por tanto, tanto la grava como la gravilla se encuentran dentro de los límites.

Por último, el ensayo de desgaste de Los Ángeles para árido grueso se realizó según lo indicado en la norma UNE EN 1097-2:99. Resumimos los resultados obtenidos en la tabla siguiente:

Tabla 14.- Desgaste de Los Ángeles del árido grueso

	Masa inicial (gr)	**Esferas**	**Vueltas**	**Masa final (gr)**	**L.A. (%)**
Grava	5000	11	500	3903	22
Gravilla	5000	8	500	3719	26

El método consiste en someter a abrasión en la máquina de Los Ángeles una muestra de árido grueso (grava y gravilla) y expresar la pérdida de material o desgaste como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra con respecto a su masa inicial.
La EHE **[27]** indica que el resultado debe ser menor al 40%, y vemos que se cumple tanto para la grava como para la gravilla.

3.2.3 Propiedades de los áridos de dragado marino

La investigación se ha llevado a cabo utilizando tres tipos diferentes de arena procedentes de dragado marino, todas ellas de zonas cercanas al puerto de Barcelona. Las muestras, fueron caracterizadas desde el punto de vista mineralógico, químico y físico.

3.2.3.1 Caracterización mineralógica

En cuanto a la caracterización mineralógica se realizó un estudio por Difracción de Rayos X de muestras en polvo. El procedimiento experimental se inició con la liofilización de las muestras y su tamizado utilizando el tamíz 0,125 μm.

El equipo utilizado fue un Bruker D8, operando con la radiación Kα-Cu (1.5406Å), con una tensión de 40kV y una intensidad de corriente de 20 mA; se registraron los difractogramas para el intervalo 2θ = 5 - 55º, con un ángulo de paso de 0.020º y un tiempo de adquisición por paso de 1 segundo.

Los difractogramas registrados fueron almacenados en soporte magnético y posteriormente fueron tratados para la identificación mineral con el programa DRXWIN versión 1.4.

Los resultados de la identificación mineralógica se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 15.- Identificación mineralógica de las muestras por difracción de rayos X.

Mineral	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Calcita CaCO3	xxx	xxx	xx	xx	xx	xx	xx	x	xx
Cuarzo SiO2	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxx
Halita NaCl	xx	xx	xx	x		x	x	x	x
Dolomita MgCa(CO3)2	xx	xx	xx	xx	x	xx	xx		x
Mica Moscovita KMgAlSi4O10(OH)2	x	x	x	x	x		xx	x	x
Albita NaAlSi3O8	x	x	x	x	x	x	xx	x	xx
Sanidina (Na,K)AlSi3O8	x	x	x			x	xx		
Hidrofilita CaCl2	xx	xx	x		x	x	x		x
Ortoclasa KAlSi3O8	x			x	xx		x	x	
Caolinita Al2Si2O5(OH)4	x	x	x	x	x	x	x		x
Ca(H2POr)2H2O							x		
Relación de picos de máxima intens	100/90	94/100	41/100	20/100	29/100	38/100	25/100	9/100	30/100
xxx: componentes mayoritarios,									
xx: componentes secundarios,									
x: componentes minoritarios y/o posibles									

En cuanto a las muestras A se observa claramente que todas están constituidas básicamente por una mezcla de cuarzo (SiO2) y calcita (CaCO3). Se debe indicar la existencia de halita (*NaCl*) en las tres muestras *A-1*, *A-2* y *A-3* e hidrofilita (*CaCl2*) en las muestras *A-1* y *A-2* como componentes secundarios y esta última como trazas en la muestra *A-3*. Este componente cristalino aparece debido a que en el proceso de liofilizado se produce la cristalización de los componentes iónicos solubles del agua de mar, especialmente en forma de cloruros.

También se han detectado dolomita (*MgCa(CO3)2*), como componente secundario en este tipo de muestras. Los otros componentes detectados en forma de trazas en las muestras *A-1*, *A-2* y *A-3* son feldespatos como albita, sanidina y ortoclasa, y minerales de tipo arcilloso tipo filosilicatos 1:1 como la caolinita y filosilicatos 2:1 como mica moscovita.

En el caso de las muestras B y C, se observa que están constituidas por cuarzo como componente mayoritario y calcita como componente secundario. También se ha detectado dolomita como componente secundario en algunas muestras (*B-1*, *B-3* y *C-1*) y como trazas en las muestras *B-2* y *C-3*.

Se debe indicar la existencia de halita (*NaCl*) en forma de trazas en casi todas las muestras de este tipo, e hidrofilita (*CaCl2*) en las muestras *B-2*, *B-3*, *C-1* y *C-3*. Como hemos dicho en el caso anterior, estos compuestos aparecen debido al proceso de liofilizado.

En algunas de las muestras B y C, se han encontrado minerales relacionados con los feldespatos como componentes secundarios como albita en las muestras *C-1* y *C-3*, sanidina en la muestra *C-1* y ortoclasa en la muestra *B-2*. En el resto de las muestras se han podido detectar estos feldespatos en cantidades de trazas. Adicionalmente se han detectado trazas de minerales arcillosos tipo filosilicatos 1:1 como la caolinita en casi todas las muestras y/o filosilicatos 2:1 como mica moscovita.

3.2.3.2 Caracterización química

En cuanto a la caracterización química, se determinaron los contenidos de cloruros soluble en agua, sulfatos, material orgánica y metales pesados, por considerarse, como hemos visto en el capítulo II, sustancias que pueden causarnos mayores problemas al formar parte de morteros y hormigones.

Previamente al análisis de cloruros solubles en agua, las muestras liofilizadas fueron tamizadas por el tamiz de 2mm y molidas en un micromolino hasta un tamaño inferior a 125µm, de acuerdo a la norma UNE EN 1744-1:1999 parte 7.

Los valores se expresan en gramos de ión cloruro por cada 100 g de muestra seca, y se muestran en la tabla 16:

Tabla 16.- Resultados de la determinación de cloruros solubles en agua.

Muestra	Cl- (PPM)	Cl- (%)
A1	1686.25	1.67
A2	1686.25	1.67
A3	1775	1.77
B1	141.55	0.14
B2	136.67	0.13
B3	135.8	0.13
C1	110.05	0.11
C2	94.07	0.09
C3	109.4	0.11
Media	-	0.647

Como podemos observar, existe una gran diferencia entre la concentración de cloruros de las muestras A y las muestras B y C. En general, la concentración en cloruros de las muestras es elevada y se encuentra en todos los casos por encima del límite establecido por la EHE **[27]**, que establece que el contenido en cloruros solubles de los áridos para hormigones en masa que lleven armadura para reducir fisuración no debe sobrepasar el 0,05%.

No obstante se debe ser cuidadoso en este aspecto, ya que la concentración de cloruros en el hormigón dependerá del porcentaje de sedimento que se utilice, por lo que si previsiblemente el hormigón a fabricar fuera armado o pretensado, debería adicionarse en cantidades muy bajas. Hay que tener en cuenta que la EHE establece que la cantidad de cloruros totales aportados por los componentes para obras de hormigón en masa con armadura para reducir fisuración no debe exceder el 0.4% sobre peso de cemento. En los morteros y hormigones que se fabricaron en esta investigación en ningún caso se sobrepasaron porcentajes de sedimento que suspusieran un exceso del límite de cloruros en la mezcla.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la concentración de cloruros en la muestra no es homogénea. Las muestras A superan en 10 veces a las anteriores en concentración, lo que sugiere que dicha muestra o parte del acopio ha sufrido una contaminación probablemente de agua de mar. Se recomendaría por tanto que previamente a su utilización en la fabricación de hormigón se homogeneizaran bien los acopios, porque si no, se corre el peligro de que según la zona del acopio donde se haya tomado la muestra, el hormigón fabricado contenga una cantidad por encima de la normativa de cloruros.

Previamente al análisis de sulfatos, las muestras, una vez liofilizadas fueron tamizadas por el tamiz de 2mm y molidas en un micromolino hasta un tamaño inferior a 125µm, de acuerdo a la norma UNE EN 1744-1:1999 parte 10.

Los valores se expresan en porcentaje en peso de SO3, y se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 17.- Resultados de la determinación de sulfatos.

Muestra	BaSO4 (G)	SO3 (%)
A1	0.007	0.23
A2	0.0072	0.25
A3	0.0061	0.21
B1	0.004	0.13
B2	0.0032	0.11
B3	0.007	0.24
C1	0.0209	0.72
C2	0.0066	0.23
C3	0.0128	0.43
Media	-	0.283

En general, la concentración de sulfatos de las muestras es significativa pero se encuentra en todos los casos por debajo del límite establecido por la EHE **[27]**, que

establece que el contenido en SO3 de los áridos no debe de superar el 0.8% de la masa de árido.

El porcentaje en sulfatos solubles en todas las muestras varía entre el 0.11 y el 0.72% expresado como porcentaje en SO3, con una media suponiendo la muestra totalmente homogeneizada del 0.28%.

Previamente al análisis del contenido de materia orgánica, se analizaron las muestras originales una vez liofilizadas y tamizadas a través de un tamiz de 125µm.

La determinación de la materia orgánica se realizó en base a las pérdidas de peso entre 210 y 430 ºC aproximadamente (materia orgánica fácilmente oxidable) y entre 200° C y 600ºC aproximadamente (materia orgánica total). Además, se observaron pérdidas entre 35 y 200 ºC atribuidas a agua de hidratación y entre 700 y 900ºC atribuidas a la descomposición de filosilicatos y carbonatos. Para ello se siguió la norma UNE EN 1744-1:99.

Los datos se expresaron como materia orgánica fácilmente oxidable y como materia orgánica total, así como, por aplicación de factores de conversión, carbono orgánico fácilmente oxidable y carbono orgánico total. Dichos datos se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 18.- Resultados de la determinación de Materia Orgánica, expresados en porcentaje de Materia Orgánica y Carbono Orgánico total

Muestra	Pérdida total	Mat. Org. facilmente oxidable	Mat. Org. total	Carb. Org facilmente oxidable	Carb. Org. total	Carbonatos (%CaC03)
A1	19.53	-	1.07	-	0.62	39.05
A2	19.67	-	0.65	-	0.37	40.20
A3	19.48	-	0.67	-	0.38	40.01
B1	13.25	-	1.11	-	0.64	27.03
B2	12.48	-	1.03	-	0.59	25.71
B3	12.34	-	0.93	-	0.54	25.38
C1	14.04	-	0.87	-	0.50	29.57
C2	13.47	-	0.77	-	0.45	28.42
C3	14.35	-	0.99	-	0.57	29.94

Se puede concluir que los valores obtenidos son todos poco significativos, ya que en ninguna muestra se supera el 1%, expresado como materia orgánica total. Cabe señalar, que debido al bajo porcentaje de materia orgánica encontrado no se ha podido distinguir el contenido de materia orgánica fácilmente oxidable.

Respecto al cálculo del contenido en carbonatos estos resultados coinciden con los analizados en difracción de rayos X, ya que las muestras A presentan un mayor contenido en carbonatos (expresado como %CaCO3) que las muestras B y C, (39.7% de media para las muestras A, frente al 26.04% de media para las muestras B y 29.31% para las muestras C).

Previamente al análisis del contenido en metales pesados, las muestras una vez liofilizadas fueron tamizadas a través del tamiz de 63 μm.

El método seguido para la preparación de muestra fue el recomendado por la Unión Europea para materiales de referencia de características similares. Concretamente para los materiales BCR Nº144 y CRM 145 (BCR Reference materials, Report EUR 15282 EN).

Para ello, se pesó aproximadamente un gramo de sedimento y se sometió a un proceso de digestión en tubos de vidrio dotados de un condensador para evitar pérdidas por volatilización. Una vez fríos estos, se filtraron empleando papel Albet Nº242. Después, el papel de filtro se lavó con HNO3 2M calentando a 50ºC. La muestra se llevó a 100 ml con agua destilada.

A continuación, se determinaron Cr, Cu, Ni, As y Zn mediante espectrometría de emisión atómica tipo ICP, calibrando el equipo con un multipatrón externo. La determinación de mercurio se realizó en los mismos digestos mediante la técnica de absorción atómica y vapor frío. Finalmente, el cadmio y el plomo se cuantificaron después de digerir la muestra con agua regia, mediante espectrometría de absorción atómica utilizando horno de grafito. Para la calibración se utilizó un patrón externo preparado en agua regia. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 19.- Resultados de la determinación de metales pesados (μm /g) en las arenas de dragado

Muestra	Cd	Cu	Zn	Cr	Ni	As	Hg	Pb
A1	nd	11.2	34.0	38.6	11.8	nd	Nd	7.3
A2	nd	12.0	34.0	46.0	13.0	nd	Nd	7.4
A3	nd	13.0	39.3	41.8	14.5	nd	Nd	7.4
B1	nd	3.7	15.6	20.0	5.7	nd	Nd	7.2
B2	nd	4.4	11.1	21.1	5.1	nd	Nd	7.3
B3	nd	4.2	19.1	19.7	5.5	nd	Nd	7.3
C1	nd	6.4	12.5	20.9	6.5	nd	Nd	7.6
C2	nd	6.6	11.3	20.0	5.5	nd	Nd	7.2
C3	nd	6.4	17.5	21.6	6.6	nd	Nd	7.4
Nivel de Acción 1	**1.0**	**100**	**500**	**200**	**100**	**80**	**0.6**	**120**

.

Respecto a los resultados obtenidos en el análisis de metales pesados se observa que todas las muestras analizadas no superan en ningún caso el nivel de Acción 1 **[34].**

3.2.3.3 Caracterización física

La caracterización física de las arenas de dragado marino comenzó con la determinación de sus granulometrías de acuerdo con la norma UNE EN 933-2:1996, como puede apreciarse en la siguiente gráfica, a la que se ha añadido la granulometría de la arena natural (0/5) con objeto de poder compararlas.

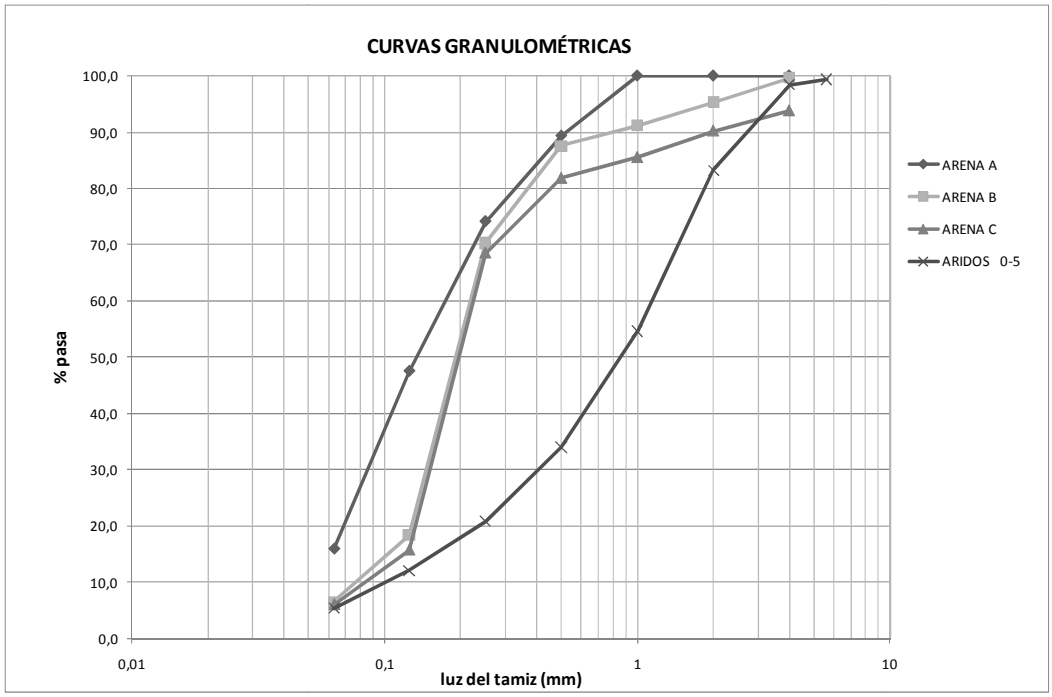


Figura 20.- Granulometría de los áridos de dragado marino

En la gráfica puede apreciarse que las arenas de dragado marino son considerablemente más finas que la arena natural procedente de cantera, lo cual, tendrá repercusiones directas sobre los morteros y hormigones fabricados con las mismas.

Por el tamiz 1mm ha pasado aproximadamente el 55% de arena 0/5mm, mientras que para la arena A el 100%, y para las arenas B y C, que presentan trayectorias muy similares, entre el 85 y el 90%.

Por el tamiz 0,25mm ha pasado el 20% de arena 0/5mm, mientras que para las arenas A, B y C pasa entre el 65% y 75% aproximadamente.

El 12% de la arena 0/5 pasa por el tamiz 0,125mm mientras que las arenas B y C presentan un porcentaje de finos entre el 15 y el 20%. Para la arena tipo A este porcentaje es del 50%, aproximándose más a los valores dados en la literatura [**11**], **[12].**

Por el tamiz 0,063 entre el 6% y 7% de las arenas 0/5mm, B, C y el 16% de la arena tipo A.

Según la EHE **[27]**, para áridos finos de origen principalmente calizo (como hemos visto en la composición mineralógica) y en ambientes marinos: IIIa (zona aérea), IIIb (zona sumergida) y IIIc (zona de mareas) la cantidad de finos que pasan por el tamiz 0.063mm no debe superar el 10%.

Como ya hemos dicho en el capítulo II, estas limitaciones se fijan como precaución frente a la posibilidad de que con la fracción fina se agreguen sustancias indeseables en la pasta. Sin embargo, las investigaciones analizadas **[12], [14], [28]** presentaban porcentajes mucho superiores de árido de tamaño limo (pasa por el tamiz 0.063), y planteaban que la presencia de dichos áridos en sí misma no era perjudicial para el hormigón, demostrando que la durabilidad del mismo puede no verse afectada por el

exceso de finos si se controlan bien y el diseño de las mezclas es correcto, sin compensar el efecto cohesionante con adicciones descontroladas de agua.

Se prosiguió con la determinación de las densidades y absorciones de agua de cada una de las arenas de las que disponemos de acuerdo con la norma UNE 83-133-90. En la tabla siguiente, pueden verse los resultados obtenidos:

Tabla 20.- Propiedades de los áridos de dragado marino

	Arena A	**Arena B**	**Arena C**
Densidad aparente(g/cm3)	2.63	2.64	2.69
Densidad seca (g/cm3)	2.52	2.52	2.64
Densidad seca saturada (g/cm3)	2.56	2.57	2.66
Absorción (%)	1.7	1.8	0.8

Cada uno de los ensayos, se realizó varias veces con objeto de valorar la posible dispersión de resultados, la cual fue muy pequeña, por lo que se halló la media aritmética de las repeticiones realizadas.

Vemos que se cumplen de nuevo las limitaciones especificadas por la EHE **[27]**, que limitan la absorción de agua por el árido superiormente en un 5%.

3.2.4 Aditivo

El aditivo utilizado en la fabricación de morteros y hormigones ha sido GLENIUM C 355 **[40]**. Se trata de un aditivo superplastificante reductor de agua de alto rango basado en éteres policarboxílicos modificados que mejoran substancialmente la cualidad de dispersión del cemento. Aumenta la trabajabilidad del hormigón permitiendo la reducción del contenido de agua. No contiene cloruros y por lo tanto no inicia ni promueve la corrosión del acero.

Este aditivo está recomendado en hormigones en los que el tiempo de control de manejabilidad y el tiempo de fraguado son críticos, así como hormigones donde se requiera reducción de agua de alto rango (12 a 40%).
Presenta ventajas como la reducción lineal de agua en todo el rango de dosis recomendado, un menor contenido de agua para un asentamiento determinado o el incremento en el desarrollo de las resistencias a compresión y flexión en todas sus etapas.

La dosificación habitual de es de 0.3 a 2.6 % sobre el peso de cemento. Si bien estas dosificaciones pueden ampliarse o reducirse en función de las necesidades de fluidificación, reducción de agua y resistencias iniciales y finales deseadas.

3.3 Fabricación de morteros

Se fabricaron 13 tipos de morteros diferentes utilizando 505 kg de cemento por metro cúbico de mortero. Se procedió a la sustitución de diferentes porcentajes de arena convencional 0/5mm de cantera por los tres tipos de arena (A, B, C) procedentes de dragados marinos realizados en varias zonas del Puerto de Barcelona. La nomenclatura adoptada para los diferentes morteros se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 21.- Morteros estudiados. Nomenclatura.

Tipo de mortero	Nomenclatura
Mortero patrón o de referencia	REF
Mortero con 5% de arena A de dragado marino	A1
Mortero con 15% de arena A de dragado marino	A2
Mortero con 25% de arena A de dragado marino	A3
Mortero A3 con 2% de plastificante	A'3
Mortero con 5% de arena B de dragado marino	B1
Mortero con 15% de arena B de dragado marino	B2
Mortero con 25% de arena B de dragado marino	B3
Mortero B3 con 0.5% de plastificante	B'3
Mortero con 5% de arena C de dragado marino	C1
Mortero con 15% de arena C de dragado marino	C2
Mortero con 25% de arena C de dragado marino	C3
Mortero C3 con 0.5% de plastificante	C'3

Cabe destacar que se eligió 25% de arena de dragado como porcentaje máximo de sustitución para garantizar una correcta fase de mezclado y compactación. Inicialmente se intentó la fabricación de morteros con porcentajes superiores de sustitución de arena, pero la mala trabajabilidad y escasa compactación nos hicieron desestimarlos al considerarse que no se obtendrían unos resultados adecuados en los ensayos.

A continuación se describirán los procesos de dosificación, fabricación, enmoldado y curado llevados a cabo para la obtención de las probetas.

3.3.1 Dosificación

Se ha adoptado la dosificación 1:3:0.5 (cemento: arena: agua) en todos los casos. Se trata de una dosificación estándar y a pesar de las sucesivas sustituciones de parte de la arena 0/5 por arena de dragado marino, siempre se ha mantenido esta proporción. Así mismo, la relación agua/cemento efectiva en todos los casos es de 0.50.
En la siguiente figura podemos apreciar visualmente el porcentaje de cada uno de los elementos fundamentales constituyentes de los morteros:

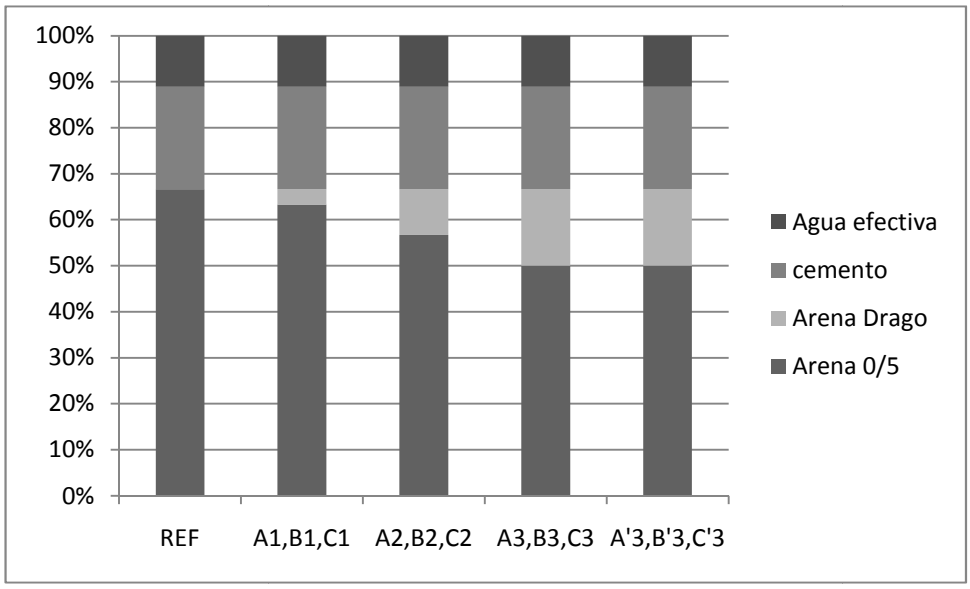


Figura 21.- Composición de los diferentes tipos de mortero

En la gráfica vemos que, como hemos dicho, la relación agua/cemento permanece constante en todo caso a 0.5 y lo mismo ocurre con las proporciones de cemento: cemento: agua (1: 3: 0.5).

Las sucesivas sustituciones de arena natural 0/5 por arena de dragado marino (tipos A, B, C) han sido del 5(1), 15(2) y 25(3) por ciento. En el caso de los morteros A'3, B'3, C'3 se utilizó superplastificante en un 2% para el caso de A'3 y en un 0,5% para el caso de B'3 y C'3, siempre referido este porcentaje al contenido en peso de cemento.

Gracias a la anterior determinación de la absorción de agua por parte de los diferentes tipos de arena, podemos ahora efectuar las correcciones oportunas en la adicción de agua con objeto de mantener una relación agua/cemento efectiva de 0.5 en todos los casos.

A la hora de realizar la corrección de agua, además del agua absorbida por los áridos se ha tenido en cuenta la añadida por el superplastificante, considerando que éste presenta un 40% de residuo sólido (dato proporcionado por el fabricante), con lo que por cada 5 gramos de superplastificante añadido, 3 gramos son de agua, que debe restarse del agua total añadida.

En las siguientes tablas se resume la dosificación utilizada para la fabricación de las probetas una vez hechas las correcciones oportunas de agua por absorción de las arenas y por adicción de plastificante:

Tabla 22.- Dosificaciones de los morteros

	REF	**A1,B1,C1**	**A2,B2,C2**	**A3,B3,C3**
	0%	**5%**	**15%**	**25%**
Cemento (gr)	1000	1000	1000	1000
Arena 0/5 (gr)	3000	2850	2550	2250
Arena Drago (gr)	0	150	450	750
Agua efectiva (gr)	500	500	500	500

Tabla 23.- Dosificaciones de los morteros con superplastificante

	A'3	B'3, C'3
	25%	**25%**
Cemento (gr)	1000	1000
Arena 0/5 (gr)	2250	2250
Arena Drago (gr)	750	750
Agua efectiva (gr)	500	500
Plastificante(gr)	20	5

3.3.2 Fabricación

Se procedió a secar las diferentes arenas que intervenían en la fabricación en la estufa a 100ºC durante 24 horas, y posteriormente al tamizado de las mismas mediante el tamiz 5mm para evitar la presencia de áridos de mayor tamaño.
La fabricación de los morteros tuvo lugar en el laboratorio de Materiales de Construcción, perteneciente al departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC. Para la fabricación de las probetas se utilizó una mezcladora de eje vertical tipo Hobart de 5 litros de capacidad (figura 22). Las rotaciones de pala y planetaria tienen unas velocidades respectivas de 225 (velocidad alta) y 100 rpm (velocidad baja).

Figura 22.- Mezcladora de eje vertical para morteros.

En todos los morteros se utilizó el mismo orden de amasado:

1) se introducen en la mezcladora el cemento más el agua y se mezclan a velocidad baja durante 30 segundos.
2) se introduce la arena en los siguientes 30 segundos sin parar la mezcladora, que continúa a velocidad lenta.
3) se añade la cantidad de agua necesaria debida a la corrección por absorción.

4) se mezcla durante 30 segundos más todo el conjunto a velocidad rápida.
5) se para la mezcladora y se limpia con una espátula la superficie de la amasadora y de la pala durante los siguientes 60 segundos.
6) Se pone en marcha de nuevo la mezcladora y se mezcla el conjunto a velocidad rápida durante otros 60 segundos.

En el caso de que se añada plastificante:

7) Se para la mezcladora volviendo a limpiar con la espátula durante 30 segundos más.
8) Se añade el plastificante y se pone en marcha la mezcladora a velocidad elevada durante 2 minutos.

En los casos en los que no se utilizó superplastificante, para los tres tipos de arena se obtuvieron unas mezclas de consistencia seca, que era lo requerido de acuerdo al uso que se propone dar al material (requerimiento de consistencia seca).

Dicha consistencia aumentaba (y por tanto disminuía la trabajabilidad) cuanto mayor era el porcentaje de sustitución de arena 0/5 por arena de dragado. Es decir, las muestras más secas de cada tipo fueron las que contenían 25% de arena de dragado marino (A3, B3, C3). En el caso de las arenas B y C, las trabajabilidades resultaron ser similares, sin embargo, una diferencia notable se observó con la arena A, en la que la consistencia del material llegó a ser muy seca. Es por ello que se decidió fabricar para el caso de los morteros A3, B3 y C3 otros idénticos en dosificación pero utilizando cierto contenido de superplastificante.

La fijación del contenido de plastificante se hizo a partir de diversos intentos con diferentes porcentajes, atendiendo en cada caso a la trabajabilidad que presentaba el mortero y a las posibilidades de obtener una buena compactación.

Se observó que un 0,5% de plastificante era suficiente para conseguir aumentar la trabajabilidad de unas muestras que antes eran bastante secas, en el caso de B'3 y C'3, y que un 2% de plastificante no era suficiente para conseguir una buena trabajabilidad, de hecho se obtuvo una mezcla muy consistente, en el caso de A'3, que inicialmente era muy seca. Se optó por no añadir más plastificante que el recomendado por el fabricante ya que un uso excesivo de aditivo puede dar lugar a segregación del hormigón y el hecho de seguir añadiendo no implica una mejora de la trabajabilidad en todos los casos. En la tabla siguiente se resumen los contenidos de superplastificante utilizados en % respecto al peso de cemento.

Tabla 24.- Plastificante utilizado en la fabricación de morteros.

	A'3	**B'3**	**C'3**
	25%	**25%**	**25%**
Plastificante	2%	0.50%	0.50%

En conclusión, podemos decir que todas las mezclas fabricadas presentaron una consistencia seca relativamente trabajable, aumentándose la dificultad para trabajar con la muestra A3 y resultando demasiado cohesiva e igualmente difícil de trabajar la A'3. En todo caso se cumplieron las especificaciones dadas por el fabricante respecto al contenido de aditivo.

3.3.3 Enmoldado

Una vez amasada la mezcla, se introduce el mortero fresco en los moldes para su posterior conservación en la cámara húmeda.

En el caso de moteros, los moldes utilizados son prismáticos de 40x40x160 mm. La introducción del mortero en los moldes (figura 23) se realiza en dos tandas, en cada una de las cuales introducimos una cantidad de mezcla de aproximadamente la mitad del volumen de los prismas (40x20x160), y procedemos a la compactación tras introducir cada una de las tandas. La compactación se realizó mediante una mesa vibratoria y el tiempo de vibrado es de 30 segundos después de cada tanda. Finalmente se enrasaron cada uno de los moldes para que la cara superior de la probeta fuese lo más lisa posible. En la figura 24 puede verse el acabado de los moldes rellenados con el mortero fresco.

Figura 23.- Introducción del mortero en los moldes.

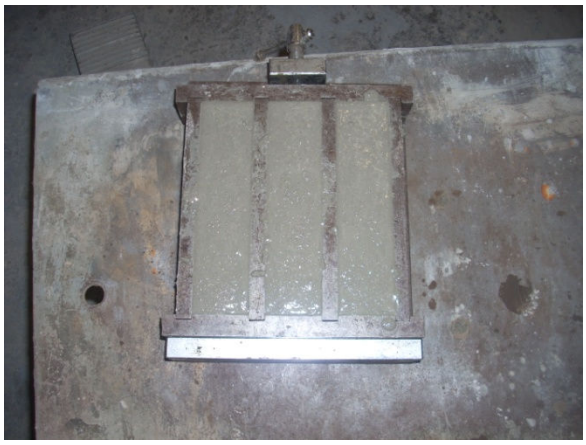


Figura 24.- Acabado de morteros tras compactar y enrasar.

Se obtuvieron 6 probetas de cada uno de los 13 tipos de hormigón para valorar su comportamiento mecánico, es decir, un total de 78 probetas prismáticas de 40x40x160 mm.

3.3.4 Curado

Una vez están fabricadas e identificadas todas las probetas de una serie, las probetas permanecen tapadas con una tela de malla húmeda que le permite mantener la humedad de fabricación constante durante las primeras 24 horas. Transcurrido este tiempo se realiza el desmoldeo de las probetas, lo cual es posible ya que el mortero ya se ha endurecido, aunque no posee todavía sus características resistentes. Tras el desmoldeo, se marcan debidamente cada una de las probetas y se guardan en la cámara húmeda para seguir el proceso de curado hasta las fechas determinadas para cada ensayo. Las probetas deben estar colocadas de tal manera que tengan cierto contacto con el agua de los aspersores de la habitación. Las condiciones de la cámara del laboratorio de Materiales de la Construcción son 21ºC y 100% de humedad.

3. 4 Fabricación de hormigones

Se fabricaron 8 tipos de hormigones utilizando 329 kilogramos de cemento por metro cúbico de hormigón. Se procedió a la sustitución de diferentes porcentajes de arena convencional 0/5mm de cantera por tres tipos de arena (A, B, C) procedentes de dragados marinos realizados en varias zonas del Puerto de Barcelona. Para todos los hormigones fabricados se utilizó el aditivo superplastificante (Glenium C 355). La nomenclatura adoptada para los diferentes hormigones se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 25.- Hormigones estudiados. Nomenclatura.

TIPO DE HORMIGÓN	NOMENCLATURA
Hormigón convencional	HC
Hormigón con 15% de arena A de dragado marino	HA15%
Hormigón con 25% de arena B de dragado marino	HB25%
Hormigón con 35% de arena B de dragado marino	HB35%
Hormigón con 50% de arena B de dragado marino	HB50%
Hormigón con 25% de arena C de dragado marino	HC25%
Hormigón con 35% de arena C de dragado marino	HC35%
Hormigón con 50% de arena C de dragado marino	HC50%

Cabe destacar que los porcentajes 15% para la arena tipo A así como 50% para las arenas B y C, fueron los límites máximos de sustitución de arenas que pudimos fabricar para garantizar una correcta fase de mezclado y compactación. Se intentaron fabricar hormigones con porcentajes de sustitución superiores para los 3 tipos de arena de dragado obteniéndose mezclas cuya trabajabilidad era pésima y cuya compactación no podía garantizarse que fuera óptima.

A continuación se describirán los procesos de dosificación, fabricación, enmoldado y curado llevados a cabo para la obtención de las probetas.

3.4.1 Dosificación

Se nos proporcionó una dosificación de referencia comúnmente utilizada en la fabricación de hormigones para pavimentos portuarios. A partir de esta dosificación, aplicando la teoría de Bolomey a nuestros áridos y realizando un primer ajuste, con objeto de asimilar al máximo nuestra curva real con la teórica, obtuvimos el porcentaje de las diferentes fracciones que componen la mezcla. Se mantuvieron las mismas condiciones en la fabricación de todos los hormigones:

- Relación agua/cemento efectiva de 0.44.
- Contenido de cemento de 329 kg/m^3.
- Consistencia seca del hormigón (cono de Abrams entre 0 y 3 cm).

A priori, se obtuvieron las densidades de los diferentes áridos componentes de la mezcla (como ya vimos anteriormente).

Las densidades se utilizaron en la obtención de la dosificación utilizada y se realizaron las correcciones de agua debidas a la absorción de los áridos y la adicción de plastificante, con objeto de mantener la relación agua/cemento efectiva en 0.44.

En la siguiente figura podemos apreciar visualmente el porcentaje de cada uno de los elementos sólidos que constituyen los hormigones.

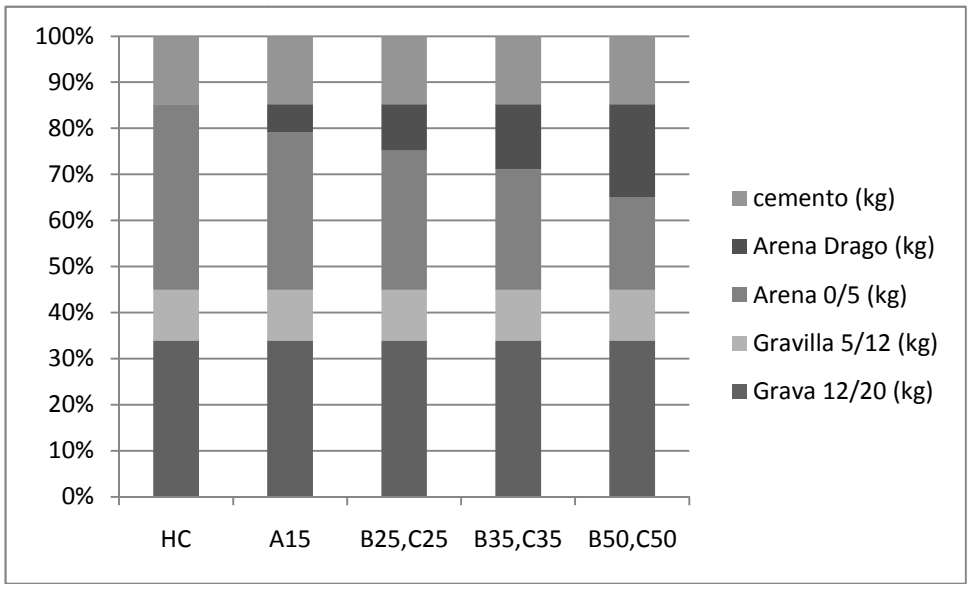


Figura 25.- Composición de los diferentes tipos de hormigón.

Las sucesivas sustituciones de arena natural 0/5 por arena de dragado marino (tipos A, B, C) han sido del 15, 25, 35 y 50%. En cada uno de los casos se utilizó el aditivo necesario, sin exceder las recomendaciones del fabricante, para obtener la consistencia deseada (consistencia seca).
En las siguientes tablas se resume la dosificación utilizada para la fabricación de las probetas una vez hechas las correcciones oportunas de agua por absorción de agua y por adicción de plastificante.

Tabla 26.- Dosificaciónes de los hormigones

	HC	A15	B25,C25	B35,C35	B50,C50
Grava 12/20 (kg)	755	755	755	755	755
Gravilla 5/12 (kg)	243.22	243.22	243.22	243.22	243.22
Arena 0/5 (kg)	896.14	761.72	672.1	582.49	448.07
Arena Drago (kg)	0	134.42	224.04	313.65	448.07
cemento (kg)	329	329	329	329	329
Agua efectiva (kg)	145	145	145	145	145
Aditivo (%)	0.6	2.6	1.5	2.3	2.6

Para los hormigones B y C del mismo porcentaje de sustitución de arena de dragado, se ha utilizado la misma cantidad de plastificante. Ello es debido a que en cuanto trabajabilidad del hormigón fresco, presentaban un comportamiento y un aspecto muy

similar. No se han excedido los valores máximos de aditivo recomendados por el fabricante

3.4.2 Fabricación

Se procedió al secado de las diferentes fracciones de árido en la estufa a 100ºC durante 24 horas, y posteriormente al tamizado de las arenas provenientes de dragado mediante el tamiz 5mm.

La fabricación de los hormigones se realizó en los laboratorios de Materiales y Estructuras de la UPC. Para la fabricación de probetas se utilizó una mezcladora de eje vertical de una capacidad máxima de 25 litros (figura 26).

Figura 26.- Mezcladora de eje vertical para hormigones

En todos los hormigones se utilizó el mismo orden de amasado. Primero se introducen en la mezcladora las dos fracciones de árido más grandes (grava y gravilla), a continuación se vierte la fracción más fina y después el cemento realizando un primer ciclo de mezclado (mezcla seca). Una vez realizada esta mezcla de áridos con el cemento, se realiza un último ciclo intentando añadir el agua en el menor tiempo posible desde la puesta en marcha de la mezcladora. El aditivo se añade en última instancia (si se cree necesario) con objeto de conseguir la consistencia deseada. En nuestro caso, debido a que todas las mezclas eran muy secas, fue necesario añadir aditivo a todas ellas. Las siguientes figuras muestran el proceso de amasado visualmente:

Figura 26.- Incorporación del cemento.

Figura 27.- Incorporación del agua.

Figura 28.- Estado de la mezcla tras incorporar el agua.

Figura 29.- Incorporación del aditivo.

Figura 30.- Estado de la mezcla tras incorporar el aditivo.

Figura 31.- Cono de Abrams. Consistencia Seca.

Después del amasado se comprobó la consistencia del hormigón fresco mediante el Cono de Abrams (figura 31). Mediante el ensayo se verificó que el hormigón fabricado estuviera en las condiciones adecuadas para realizar las probetas. Para medir la consistencia del hormigón se realizó el ensayo del cono de acuerdo con la norma UNE-EN 83-313-90. Dicho ensayo consiste en llenar un molde de forma troncocónica de 30cm de altura en tres capas de cantidad similar de hormigón cada una, compactando cada capa con una barra de hierro mediante 25 golpes. Una vez se ha llenado todo el molde, se enrasa superiormente y se procede a levantar el cono verticalmente sin movimientos bruscos. En la tabla se resumen las consistencias que fija el ensayo del cono de Abrams:

*Tabla 27.- Consistencias Cono de Abrams **[27]**.*

Consistencia	Asiento (cm)
Seca	0 – 2
Plástica	3 – 5
Blanda	6 – 9
Fluida	10 - 15

La medida de la consistencia se obtiene mediante la diferencia del asiento del hormigón que había en el molde con respecto a la altura de este, en centímetros. En función de este descenso, se puede definir la consistencia del hormigón.

En la tabla siguiente se muestran los resultados del cono de Abrams que se obtuvieron en los hormigones fabricados:

Tabla 28.- Asiento de los hormigones fabricados.

Consistencia	Asiento (cm)
HC	1
HA15%	0
HB25%	1
HB35%	3
HB50%	1.5
HC25%	2
HC35%	1.5
HC50%	1.5

Como se aprecia en la tabla, todos los hormigones presentan consistencia seca, que es la que se buscaba. En cada hormigón se añadió una cantidad de aditivo entre el 0,6 y el 2,6% del peso de cemento para conseguir una consistencia adecuada. En el caso de la arena A, que ha resultado ser menos trabajable, no se obtuvo compactación ni trabajabilidad adecuadas para porcentajes mayores a un 15% de sustitución de arena. Se observa que añadiendo mucho aditivo, la mezcla queda muy plástica y sigue siendo difícil de trabajar. Además, debemos tener en cuenta que un uso excesivo de aditivo puede dar lugar a segregación en el hormigón.

3.4.3 Enmoldado

Una vez amasada la mezcla, se introduce el hormigón fresco en los moldes para su posterior conservación en la cámara húmeda.

Los moldes utilizados en la fabricación de las probetas de cada uno de los tipos de hormigón han sido los siguientes:

- 15 moldes cilíndricos 10x20cm

- 3 moldes cilíndricos de 15x20cm
- 1 molde cilíndrico de 15x15 cm.
- 4 moldes prismáticos 10x10x40cm
- 5 moldes cúbicos de 10x10x10cm

La introducción del hormigón en los moldes se realiza en dos tandas, en cada una de las cuales introducimos una cantidad de mezcla de aproximadamente la mitad del volumen de los moldes, y procedemos a la compactación tras introducir cada una de las tandas. La compactación se realizó mediante una mesa vibratoria y el tiempo de vibrado es de 30 segundos después de cada tanda. Finalmente se enrasaron cada uno de los moldes con ayuda de una espátula para conseguir que la cara superior de la probeta fuese lo más lisa posible (figura 32).

Figura 32.- Hormigón fresco en los moldes una vez enrasado.

Considerando los 8 tipos de hormigón analizados, se obtuvieron un total de 224 probetas, en una extensa campaña de fabricación que posteriormente se utilizaron para analizar el comportamiento mecánico de los mismos.

3.4.4 Curado

Una vez están fabricadas e identificadas todas las probetas de una serie, las probetas permanecen tapadas con una tela de malla húmeda que le permite mantener la humedad de fabricación constante durante las primeras 24 horas. Transcurrido este tiempo se realiza el desmoldeo de las probetas, lo cual es posible ya que el hormigón ya se ha endurecido, aunque no posee todavía sus características resistentes. Tras el desmoldeo, se marcan debidamente cada una de las probetas y se guardan en la cámara húmeda para seguir el proceso de curado hasta las fechas determinadas para cada ensayo (figuras 33 y 34). Las probetas deben estar colocadas de tal manera que tengan cierto contacto con el agua de los aspersores de la habitación. Las condiciones de la cámara del laboratorio de Materiales de la Construcción son 21ºC y 100% de humedad. El tiempo de curado en la cámara dependerá de los ensayos a realizar. Los primeros se inician a los 7 días, y el resto, a partir de los 28.

Figura 33. Probetas cilíndricas marcadas en la cámara húmeda

Figura 34. Probetas prismáticas marcadas en la cámara húmeda

3.4.5 Refrentado

Fue necesario refrentar las probetas cilíndricas de 10x20cm que se destinarían al ensayo de rotura a compresión. El refrentado, debe realizarse siempre antes de proceder a dicho ensayo.

El objetivo del refrentado es cubrir las irregularidades de fabricación de la cara superior de la probeta, de manera que resulte una superficie totalmente plana y perpendicular a su arista, para que al proceder a su rotura, las presiones se repartan uniformemente en toda la superficie de la cara superior y que ésta y la inferior sean paralelas.

El material utilizado para el refrentado fue mortero de azufre, el cual, debe tener una resistencia igual o superior a la del hormigón que conforma la probeta y en todo caso superior a 359kg/cm^2 a las dos horas. Se compone por un 62% en peso de azufre monoclínico polvorizado, un 36% de arena silícica y un 2% de negro humo.

El dispositivo de refrentado (figura 35) consta de un plato de refrentado que debe tener un diámetro superior en 25mm al diámetro de la probeta, una superficie plana y un mecanismo de alineación que asegure la ortogonalidad entre la superficie refrentada y el eje de la probeta.

En primer lugar se coloca el mortero en el recipiente de calentamiento a una temperatura no superior a los 150ºC. Se considera que está preparado cuando el azufre está totalmente fundido.

Acto seguido se aplica al plato del dispositivo de refrentado una ligera cada de aceite.
Se limpia y se retira el exceso de humedad superficial de la cara de la probeta a refrentar para impedir la formación de burbujas bajo material de refrentado.

Se pone una cantidad suficiente de mortero de forma que el plato del dispositivo de refrentado quede totalmente lleno. Inmendiatamente después se coloca la probeta sobre éste presionándola en sentido descendente y contra el soporte perpendicular del dispositivo.

Transcurridos 45 segundos, el mortero se ha endurecido lo suficiente para proceder al desmoldado de la probeta, operación que se efectúa golpeando ligeramente el contorno del plato con un martillo ligero, y se extrae la probeta del dispositivo.

Una vez acabada la operación de refrentado, hay que comprobar que la capa aplicada no presenta fisuras, burbuja, zonas con falta de adherencia ni irregularidades en la superficie.

El proceso se repite con cada una de las probetas cilíndricas que utilicemos para realizar el ensayo a compresión (figura 36).

Figura 35.- Dispositivo de refrentado.

Figura 36.- Probetas cilíndricas refrentadas.

CAPITULO IV.

PROPIEDADES DE MORTERO Y HORMIGÓN ENDURECIDOS

4.1 Introducción

En el presente capítulo se desarrollan y detallan los ensayos realizados sobre los morteros y hormigones endurecidos a diferentes edades de maduración, así como los resultados obtenidos de dichos ensayos y las observaciones correspondientes a los mismos.

4.2 Ensayos sobre mortero endurecido

Los ensayos que se llevaron a cabo sobre morteros en este estudio han sido los siguientes:

- Compresión
- flexo-tracción.

Los ensayos se hicieron para todos los tipos de mortero descritos anteriormente en la nomenclatura.

4.2.1 Ensayo de compresión

Se evaluó la resistencia a compresión de los morteros a edades de 7 y 28 días. Para cada edad y cada tipo de mortero se ensayaron 6 probetas prismáticas de 40x40x160mm de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-3.

El ensayo consistió en comprimir las probetas aplicando una carga hasta la rotura de las mismas en una máquina de prensado como la que podemos ver en la figura siguiente:

Figura 37.- Máquina de prensado para morteros y hormigones

La máquina dispone de dos platos de acero con caras planas y de superficie superior en un mínimo de un 3% a la de la probeta a ensayar. El espesor de los platos debe asegurar la indeformabilidad de los mismos durante el ensayo.

Tras colocar la probeta, se aplica la carga de forma continua y sin saltos bruscos, de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta sea de 0.5 ± 2 MPa/s (N/mm^2s). La velocidad de carga debe ser constante hasta que la probeta se deforme rápidamente antes de la rotura. Se toma como carga de rotura la máxima alcanzada y se calcula la resistencia a compresión del mortero.

4.2.2 Ensayo de flexo-tracción

Se evaluó la resistencia a flexo-tracción de los morteros a edades de 7 y 28 días. Para cada edad y cada tipo de mortero se ensayaron 3 probetas prismáticas de 10x10x160mm de acuerdo con la norma UNE 83509.

El ensayo consistió en aplicar una carga de flexión a las probetas hasta la rotura de las mismas en una máquina de prensado como la utilizada en el ensayo a compresión (figura 37).

Los elementos de transmisión de cargas deben asegurar que la fuerza se aplica perpendicularmente a la cara de la probeta.

Se aplica la carga de forma continua y sin saltos bruscos, de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta sea de 0,05 ± 0,01 MPa/s(N/mm^2s). La carga se aplica sin variación hasta que la probeta se deforme rápidamente antes de la rotura. Se toma como carga de rotura la máxima alcanzada y se calcula la resistencia a tracción del mortero.

4.3 Ensayos sobre hormigón endurecido

Los ensayos que se llevaron a cabo sobre hormigones en este estudio fueron los siguientes:

- Densidad, absorción, poros accesibles.
- Compresión
- Flexo-tracción
- Flexión indirecta (brasileño)
- Succión
- Penetración de agua bajo presión
- Abrasión
- Resistencia al impacto
- Ultrasonido

Los ensayos de compresión y flexo-tracción se hicieron para todos los tipos de hormigones descritos anteriormente en la nomenclatura.

El resto de ensayos, se realizaron únicamente sobre hormigones fabricados con arenas B y C, con un mínimo de 35% de arena de dragado. No se ensayaron probetas con un porcentaje de arena marina inferior al considerarse que los resultados de compresión y flexo-tracción en ellas eran similares a los obtenidos con el 35%.

La arena tipo A fue descartada a la hora de realizar otros ensayos debido a la dificultad de compactación de los hormigones fabricados con ella.

4.3.1 Ensayos de densidad, absorción y poros accesibles.

Para la determinación de la densidad, la absorción de agua y los poros accesibles del hormigón endurecido se ensayaron 3 probetas cúbicas de 10x10x10cm de cada tipo de hormigón, siguiendo las especificaciones de la norma UNE 83-312-90 y se consultó la norma ASTM C642-97.

Fue necesaria una balanza hidrostática equipada con un cestillo para pesar la muestra en agua.

La muestra se pesó de 3 maneras diferentes para la determinación de su masa:

- Sumergiéndola en agua a 20 ± 2º C hasta que no se observe ningún incremento de masa para posteriormente secarla utilizando un paño húmedo de forma que se retire el agua superficial obtendremos la masa de la muestra saturada con superficie seca, m_1.

- Secando la muestra en la estufa a 105 ± 5º C hasta que no se observe variación en la masa (un mínimo de 24 horas) se obtendrá la masa de la muestra secada en estufa, m_2.

- Mediante la balanza hidrostática, manteniendo la muestra totalmente sumergida en agua, después de haberla tenido sumergida durante 4 días para llegar a su saturación obtendremos la masa hidrostática, m_3.

A partir de estos datos, se determinaron las siguientes densidades:

Densidad de la muestra saturada: $\rho_1 = \left[\frac{m_1}{m_1 - m_3}\right] \cdot \rho_w$ *(1)*

Densidad de la muestra secada en estufa: $\rho_2 = \left[\frac{m_2}{m_1 - m_3}\right] \cdot \rho_w$ *(2)*

Densidad de la muestra aparente: $\rho_3 = \left[\frac{m_2}{m_2 - m_3}\right] \cdot \rho_w$ *(3)*

Donde

ρ_w es la densidad del agua

4.3.2 Ensayo de compresión

Se evaluó la resistencia a compresión de los hormigones a edades de 7 y 28 días. Para cada edad y cada tipo de hormigón, se ensayaron 3 probetas cilíndricas de 10x20cm de acuerdo con la norma UNE-EN 12390-3. Posteriormente se fabricaron 2 probetas más de cada tipo de hormigón a modo de comprobación de la resistencia presentada por las primeras, éstas últimas fueron ensayadas solamente a los 28 días de curado.

El ensayo es idéntico al descrito en el caso de los morteros, y se realiza con la misma máquina de compresión (figura 35) pero en este caso, al tener que ejercer la carga sobre una de las bases circulares de la probeta que fue enrasada a mano con la espátula, pueden existir irregularidades en la superficie y es necesario refrentar las probetas previamente a la realización del ensayo.

El refrentado se realizó con mortero de azufre sobre la cara rugosa tal y como se describió en el capítulo III, de modo que ambas superficies opuestas queden totalmente planas.

4.3.3 Ensayo de flexo-tracción

Se evaluó la resistencia a flexo-tracción de los hormigones a la edad de 28 días. Para cada tipo de hormigón, se ensayaron 3 probetas prismáticas de 10x10x40cm de acuerdo con la norma EN 14651. Posteriormente se fabricó 1 probeta más de cada tipo de hormigón a modo de comprobación de la resistencia presentada por las primeras.
El ensayo consiste en aplicar una carga de flexión a las probetas hasta la rotura de las mismas en una máquina de prensado.

Los elementos de transmisión de cargas deben asegurar que la fuerza se aplica perpendicularmente a la cara de la probeta.

El mecanismo para la aplicación de cargas (figura 38), consiste en dos rodillos para apoyo de la probeta y dos rodillos para la aplicación de la carga. Los rodillos deben tener una sección circular con un diámetro de 20mm y una longitud superior en 10mm a la dimensión menor de la probeta a ensayar. La distancia entre rodillos de apoyo debe ser de 3 veces la dimensión menor de la probeta.

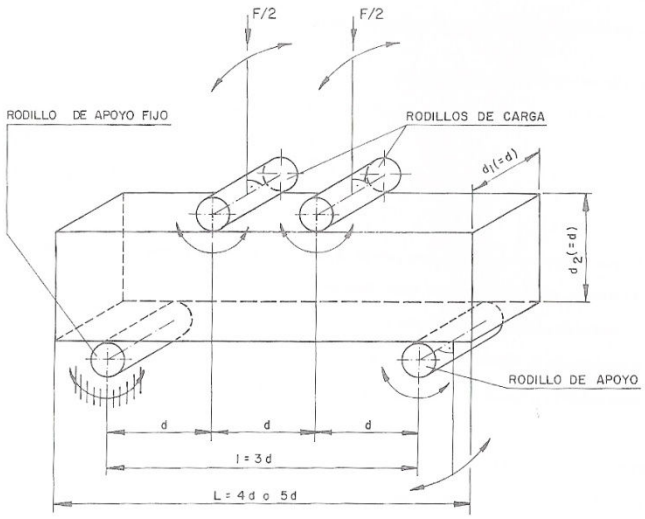


Figura 38.- Mecanismo de aplicación de las cargas para el ensayo de flexo-tracción.

En este caso, no fue necesario el refrentado de las probetas, ya que el contacto de la prensa con la probeta se hizo eligiendo dos caras opuestas perfectamente planas, quedando la única cara rugosa en uno de los laterales.

4.3.4 Ensayo de tracción indirecta (ensayo brasileño)

Se evaluó la resistencia a tracción indirecta de los hormigones a 28 días de edad. Para cada tipo de mortero se ensayaron 3 probetas cilíndricas de 10x20cm de acuerdo con la norma UNE 83-306-85.

El ensayo consiste en comprimir las probetas aplicando una carga hasta la rotura de las mismas en la misma máquina de prensado que se utiliza en los ensayos de compresión (figura 35).

La probeta se coloca horizontalmente apoyada en el plato inferior de manera que las superficies planas queden perpendiculares al plato de carga. Con esta colocación se consigue que la carga se aplique únicamente sobre una generatriz. A continuación se aplicará la carga de forma continua y sin aumentos bruscos de manera que la progresión de la tensión de tracción indirecta sea de 0.3 ± 0.1 kp/cm^2/s (0.03 ± 0.01 MPa/s).

Para el cálculo de la tensión de la tracción indirecta se empleó la siguiente expresión:

$$f_{ti} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d} \qquad (4)$$

Siendo:

f_{ti} la tensión de tracción indirecta
P la carga aplicada
l la longitud de la probeta
d el diámetro de la probeta

La tensión de rotura a tracción indirecta se redondeará a 1 kp/cm^2 (0.1 MPa).

4.3.5 Ensayo de succión capilar

Se evaluó la succión capilar de los diferentes tipos de hormigón a partir de 3 probetas cúbicas de 10x10x10cm de cada tipo.

La succión se define como la relación entre el volumen de agua absorbido por unidad de área entre la raíz cuadrada del tiempo:

$$\frac{1}{\Theta}\int F dt = S \cdot t^{1/2} \qquad (5)$$

donde

S Succión

El ensayo consiste en sumergir una probeta de hormigón en agua de manera que ésta solo pueda ser absorbida por la parte inferior de la probeta, para ello se impermeabilizarán unos 2 centímetros en la parte inferior de las caras laterales. El nivel del agua debe ser 5mm superior a la superficie de hormigón en contacto con agua, tal y como se puede ver en la figura 39.

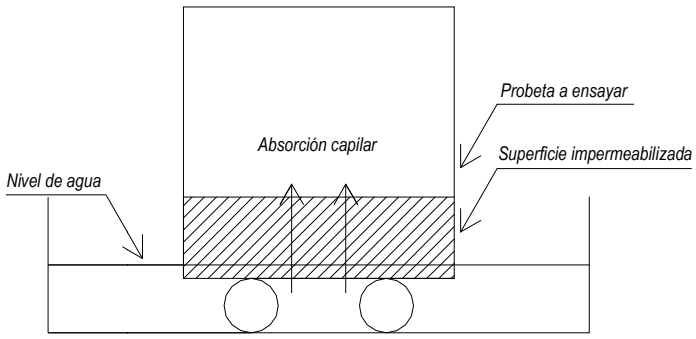


Figura 39.- Esquema del ensayo de succión

Se tomaron medidas en los tiempos de 0 (inicio), 10, 30, 60, 90 y 120 minutos y se continuará a las 6, 24, 48 y 72 horas. Se pesó la muestra en cada uno de estos instantes,

de modo que el incremento en peso de la misma, es directamente el peso del agua absorbida.

Inicialmente, las muestras deben estar completamente secas, por ello tras el periodo de curado en la cámara húmeda de 28 días, se introdujeron en un horno a 50ºC durante 4 días más. De esta forma, el proceso de secado es lento y no produce fisuras, lo que podría provocar resultados erróneos.

4.3.6 Ensayo de penetración de agua bajo presión

Se evaluó la profundidad de penetración de agua bajo presión tras un periodo de curado de las probetas de 28 días. Para cada tipo de hormigón se ensayaron 3 probetas cilíndricas de 15x15cm. Para la realización del ensayo se siguió la norma UNE-EN 12390:8-2001.

Con objeto de suprimir la capa superficial del hormigón, se debe tratar la zona de ensayo mediante un procedimiento adecuado, por ejemplo, un cepillado con púas metálicas al finalizar el fraguado o un repicado para hormigones más endurecidos. En nuestro caso se optó por cortar probetas de 15x30cm por la mitad, obteniéndose probetas de 15x15cm. La base cortada de las probetas, es la que estará en contacto con el agua a presión.

Durante al menos 48 horas antes de la realización del ensayo, se procedió a un secado en estufa a 50ºC, con objeto de eliminar la humedad evitando la aparición de fisuras que podrías provocar un falseamiento de los resultados si el secado fuese a mayor temperatura.

Una vez las probetas se enfriaron a 20ºC, se impermeabilizaron los laterales de las mismas, con objeto de evitar el contacto de éstos con el agua, y se introdujeron en los moldes cilíndricos propios para la realización del ensayo.

Se aplica a cada probeta una presión de agua de 500 ± 50 KPa durant 72 horas por la base cortada (más lisa). Si durante este proceso existen fugas, el ensayo debe pararse y no será posible su análisis. En las figuras siguientes pueden verse probetas antes y durante el ensayo:

Figura 40.- Probetas en los moldes para ensayo de penetración de agua.

Figura 41.- Probetas durante el ensayo de penetración de agua.

Tras el periodo de aplicación de la presión, se saca la probeta del dispositivo de ensayo, se limpia el exceso de agua de la cara sometida a presión y se rompe la probeta en dos mitades, perpendicularmente a dicha cara, siguiendo el procedimiento establecido para determinar la resistencia a tracción indirecta del hormigón según el método brasileño (norma UNE 83-306-85). La máquina utilizada para romper la probeta en este caso fue la mostrada en la figura siguiente:

Figura 42.- Prensa utilizada en la rotura de probetas del ensayo penetración de agua

Inmediatamente después de romper la probeta, se marca con un rotulador el frente de penetración de agua, se mide la profundidad máxima de penetración y se calcula la

profundidad media. Todas estas operaciones se realizan apoyando la probeta sobre la cara expuesta al agua.

4.3.7 Ensayo de abrasión

Se trata de una adaptación del ensayo de Los Ángeles llevado a cabo para los áridos, pero esta vez para probetas de hormigón. Se utilizaron para cada hormigón 6 probetas cilíndricas de 10x6,5cm aproximadamente obtenidas a partir del corte de 2 probetas cilíndricas de 10x20cm en tres partes. Se siguieron los pasos detallados en la norma UNE-EN 12697-17:2006+A1.

En primer lugar, se determinó la masa W_1 de la probeta utilizando una balanza. Después, se introdujo la probeta en el interior del tambor de la máquina de Los Ángeles, y, sin introducir las bolas metálicas, se debe hacer que el tambor gire a una velocidad de 3,1 rad/s a 3,5 rad/s durante 300 vueltas, lo conllevó un tiempo de unos 10 minutos aproximadamente. En la siguiente figura puede observarse el tambor de Los Ángeles:

Figura 43. Tambor para el ensayo de Los Ángeles.

Tras sacar la probeta de la máquina, se debe limpiar ligeramente con un paño para eliminar las partículas que estén claramente sueltas. Posteriormente se determinó la masa de la probeta, W_2. Se repitió el ensayo con cada una de las probetas de las que se dispone.

Para cada probeta, se calculó la pérdida de partículas, PL, aplicando la fórmula siguiente:

$$PL = 100x\frac{(W_2 - W_1)}{W_1} \qquad (6)$$

donde

PL es el valor de la pérdida de partículas, expresado en porcentaje (%).

4.3.8 Ensayo de resistencia al impacto

Se trata de una adaptación del ensayo de resistencia al impacto llevado a cabo para hormigones con fibras. Para llevar a cabo el ensayo, se utilizaron para cada hormigón varias probetas cilíndricas de 15 x 6,5cm obtenidas a partir del corte de probetas de 15x15 cm cortadas perpendicularmente a la generatriz de las mismas. Se siguieron los pasos detallados en la norma UNE-EN 83514.

El dispositivo de ensayo se compone de una placa base de acero con cuatro pletinas de tope soldadas tal y como se ve en las figuras 41 y 42. Mediante un soporte solidario con el conjunto anterior, se sujetará un tubo cilíndrico de aproximadamente 65 cm de diámetro interior y 50 mm de longitud con su eje en posición vertical y quedando a una altura de 68 mm sobre la placa base. También se utiliza una bola de acero de dureza HV 400 y de aproximadamente 65 mm de diámetro que pueda deslizar sin rozamiento dentro del tubo cilíndrico.

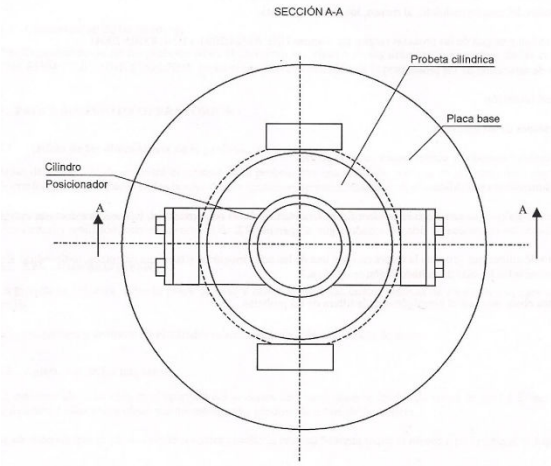


Figura 44.- Esquema del dispositivo de ensayo de resistencia a impacto

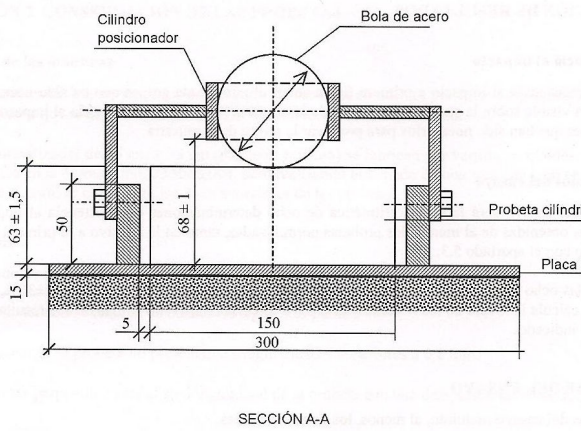


Figura 45.- Sección A-A del dispositivo de ensayo

Las bases de las probetas a ensayar no deben presentar irregularidades superiores a 0,2 mm y deben ser perpendiculares al eje longitudinal de la probeta, con una desviación máxima de 5º.

La probeta se coloca sobre la placa e base y centrada entre las cuatro pletinas de tope con una cara cortada hacia arriba. Sobre la probeta se coloca la bola de acero.

La maza metálica se deja caer verticalmente desde una altura de 457 mm sobre la bola de acero tantas veces como sea necesario para producir la rotura de la probeta. Se considera que se ha alcanzado la rotura cuando la probeta fisurada toque al menos tres pletinas de tope.

Se define la resistencia al impacto a primera fisura como el número de golpes que ha sido necesario para provocar la primera fisura visible sobre la superficie superior de la muestra. Se define la resistencia al impacto a rotura como el número de golpes que han sido necesarios para provocar la rotura de la muestra.

4.3.9 Ensayo de velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos (UPV)

Se determinó la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos de las probetas tras un periodo de curado de 28 días. Para cada tipo de hormigón se ensayaron 3 probetas cilíndricas de 10x20cm de acuerdo con la norma UNE 83-308-86.

El ensayo consiste en mantener en contacto la superficie del hormigón con un palpador electro-acústico que produce impulsos de vibraciones longitudinales Después de atravesar un recorrido de longitud l, los impulsos se convierten en una señal eléctrica y por medio de un segundo palpador y un circuito electrónico, se mide el tiempo de propagación de los impusos, t.

Aunque la dirección en la que se propagan los impulsos de máxima energía es la normal a la cara del palpador emisor, es también posible detectar impulsos en cualquier otra dirección.

El aparato instrumental consta esencialmente de un generador de impulsos eléctricos, un par de palapadores, un amplificador y un circuito electrónico de medida del tiempo.

Existen tres formas de colocación de los palpadores: en caras opuestas (transmisión directa), en caras adyacentes (trasmisión semidirecta) o en la misma cara (transmisión superficial). En general, la más recomendable es la que permite una transmisión directa, ya que la máxima energía de los impulsos se dirige hacia el palpador receptor, obteniéndose la máxima sensibilidad. Por tanto, fue la transmisión directa la que se utilizó en el ensayo. En la siguiente figura se puede ver un esquema de transmisión directa:

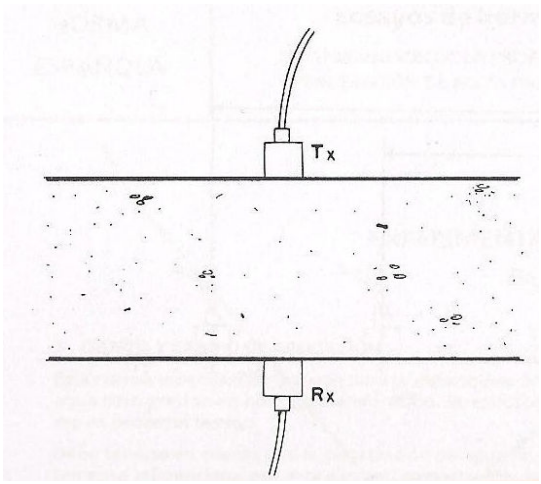


Figura 46.- Esquema de transmisión directa del ensayo UPV

Para asegurar el adecuado acoplamiento entre el hormigón y la superficie de cada palpador, evitando las rugosidades que puede presentar el primero, se suele utilizar algún elemento de acoplamiento como vaselina, grasa, jabón o glicerina. La capa de este elemento que se interpone entre el hormigón y el acoplador debe ser muy delgada.

La velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos en metros por segundo viene dada por la fórmula:

$$V = \frac{l}{t} \qquad (7)$$

donde

l es la longitud del camino recorrido, en metros.
t es el tiempo de propagación, en segundos.

La UPV es una técnica utilizada como indicador de control de calidad de productos que se supone están hechos de un hormigón similar. Aspectos como la falta de compactación o un cambio en la relación agua cemento, pueden ser fácilmente detectados.

4.4 Resultados y discusión de las propiedades de mortero endurecido

4.4.1Compresión

A continuación (tabla 29), se detallan los valores de las resistencias a compresión obtenidas a 7 y 28 días.

Tabla 29.- Resultados de los ensayos de resistencia a compresión en morteros, en MPa.

	MORTERO	REF (0%)	1 (5%)	2 (15%)	3 (25%)	'3 (25%)
7 días	**A**	29,27	34,35	34,31	29,98	-
	B	29,27	33,60	32,18	32,33	35,93
	C	29,27	31,62	33,43	32,50	30,38
28 días	**A**	37,67	38,11	39,31	35,84	-
	B	37,67	41,26	41,62	43,95	48,33
	C	37,67	38,93	40,63	39,45	46,37

Para hacer un análisis comparativo más exacto, se ha elaborado la figura 47, donde se compara la resistencia a compresión a 7 y 28 días de todos los morteros en porcentaje respecto a la del mortero de referencia.

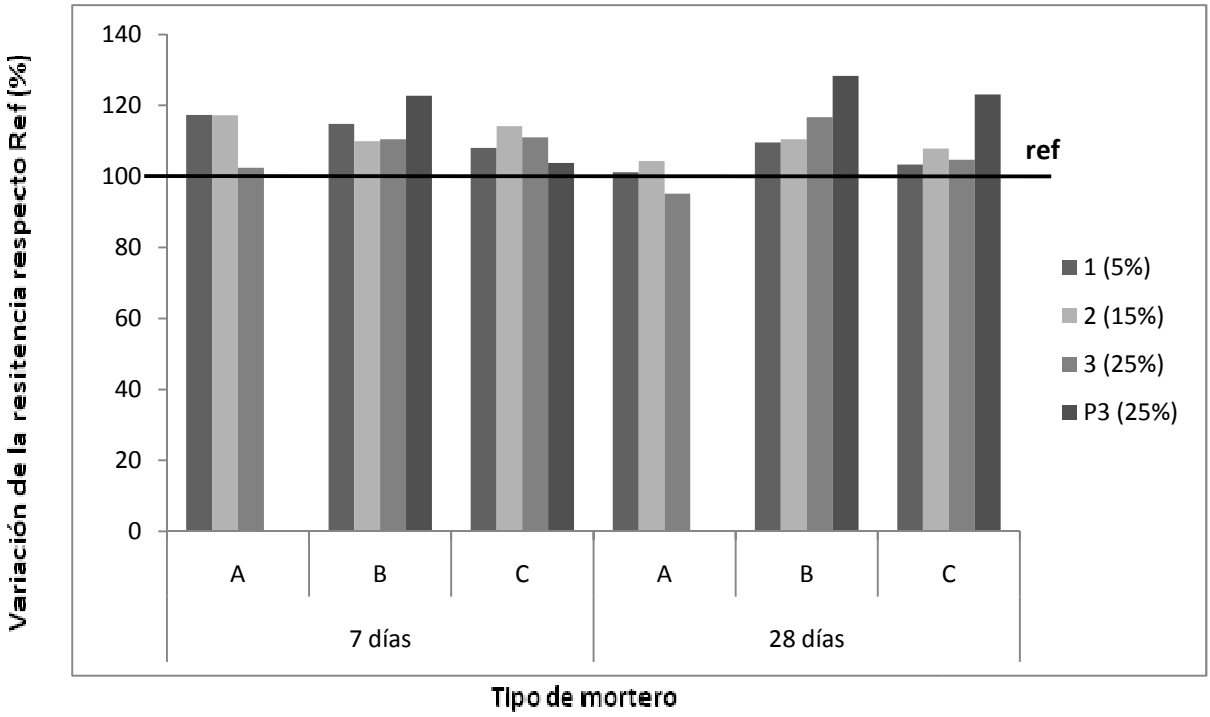


Figura 47.- Resistencia a compresión de morteros en %, respecto REF

Para los morteros tipo A:

- A 7 días de curado, A1 y A2 alcanzaron resistencias muy similares y superiores al mortero convencional. El mortero A3 obtuvo menores resistencias que A1 y A2, sin embargo la resistencia fue superior al mortero convencional.

- Las resistencias obtenidas a 28 días de curado por los morteros fabricados con arena marina tipo A, fueron similares a las del mortero convencional. El mortero A2 obtuvo la resistencia más alta y el mortero A3 obtuvo resistencias inferiores al motero de referencia.

Para los morteros tipo B:

- A 7 días de curado todos los morteros, independientemente del contenido de arena marina, obtuvieron similares resistencias.

- A 28 días de curado, cuanto mayor porcentaje de arena marina se utilizó en la fabricación de mortero, mayor resistencia se obtuvo.

- La incorporación de aditivo en el mortero, hizo aumentar su resistencia debido probablemente a una mejor colocación del material en el molde y una adecuada compactación gracias a la mejora de la trabajabilidad del mortero.

- En todos los casos se obtuvieron resistencias a compresión superiores a las del mortero de referencia.

Para los morteros tipo C:

- Entre los morteros fabricados sin aditivo, todos los morteros (tanto a 7 días como a 28 días) obtuvieron resistencias superiores al mortero de referencia. El mortero C2 obtuvo la resistencia mayor. Los morteros C1 y C3 alcanzaron resistencias similares.

- La incorporación de aditivo mejoró la resistencia del mortero a 28 días de curado.

- En todos los casos se obtuvieron resistencias a compresión superiores a las del mortero de referencia.

Se puede afirmar que los morteros en los que se utilizó arena tipo B se alcanzaron mayores resistencias, seguidas por los tipo C y por último los tipo A. Por tanto, parece que la arena tipo B resulta más apropiada para la fabricación de morteros a efectos de resistencia a compresión. Si comparamos los resultados con los obtenidos en la investigación llevada a cabo por Agostini et al **[20]**, sobre morteros con diferentes porcentajes de arena de dragado marino, en la que se obtenía un aumento de resistencia respecto al mortero convencional para las sustituciones baja y media, vemos que ocurre lo mismo con los morteros fabricados con arenas B a 28 días de curado.

Para poder apreciar la variación de resistencias desde otra perspectiva, se han elaborado las figuras 48, 49 y 50, donde se puede ver la evolución de la resistencia de cada tipo de mortero con el paso del tiempo, de los 7 a los 28 días de maduración, interpolando las resistencias intermedias a partir de estos dos puntos.

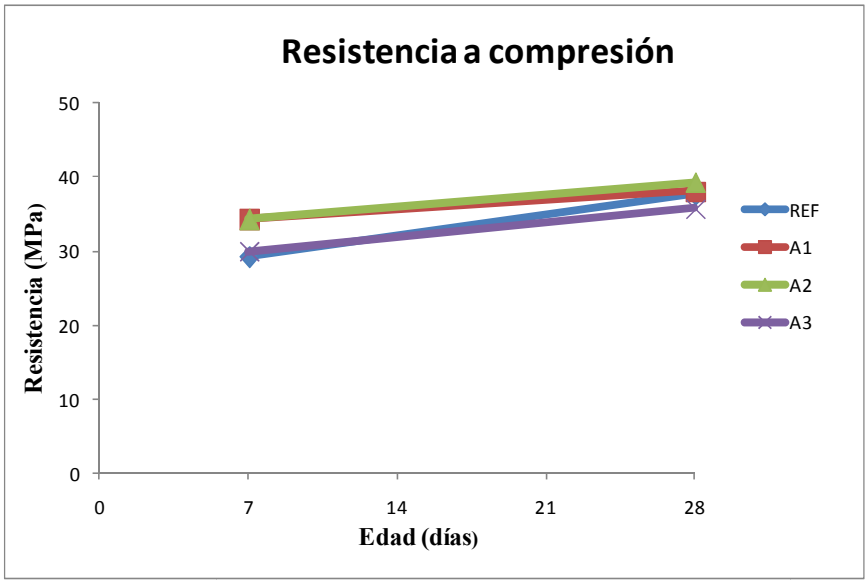


Figura 48.- Evolución de la resistencia a compresión en morteros. Arena tipo A.

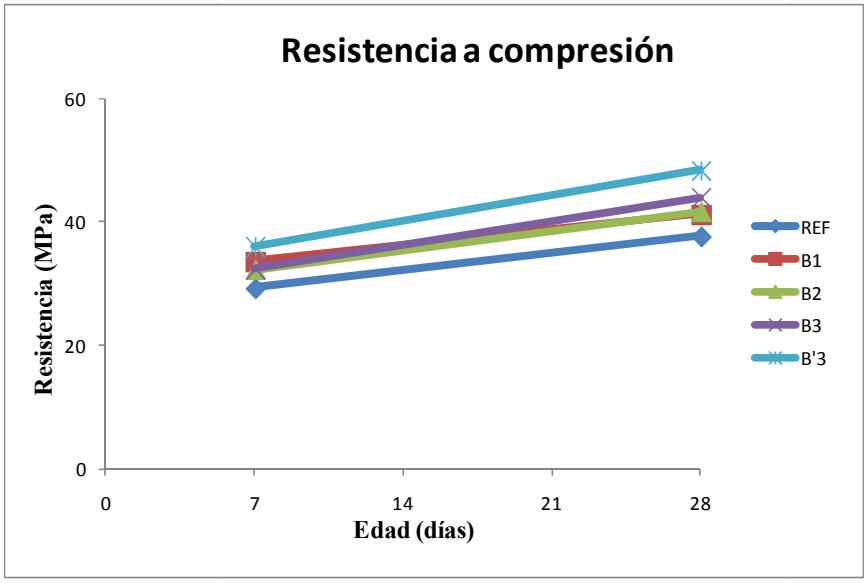


Figura 49.- Evolución de la resistencia a compresión en morteros. Arena tipo B.

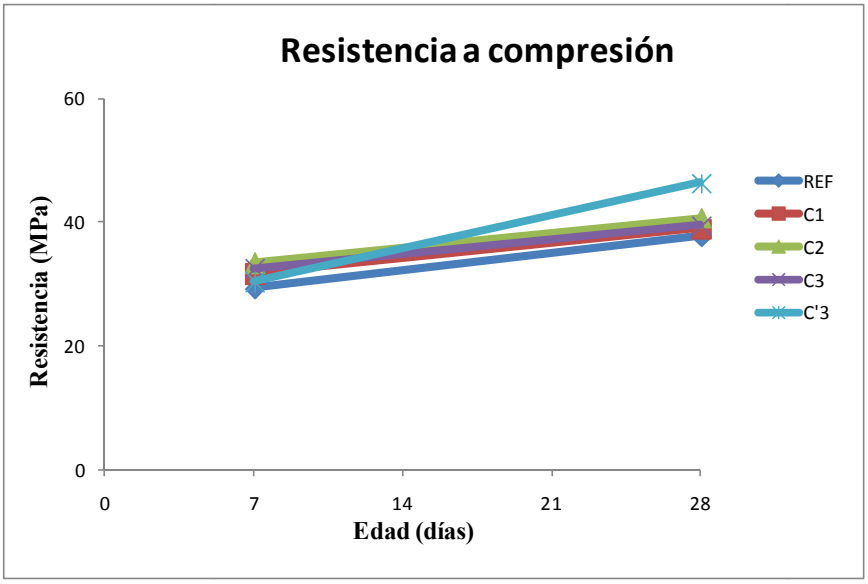


Figura 50.- Evolución de la resistencia a compresión en morteros. Arena tipo C.

La tabla siguiente muestra para cada mortero la evolución de resistencias a compresión en porcentaje, respecto la resistencia a 7 días de curado:

Tabla 30.- Evolución de la resistencia a compresión en morteros, en %

Evolución de las resistencias (%)											
REF	**A1**	**A2**	**A3**	**B1**	**B2**	**B3**	**B'3**	**C1**	**C2**	**C3**	**C'3**
28,7	11,0	14,6	19,5	22,8	29,3	35,9	34,5	23,12	21,53	21,38	52,63

Mediante los gráficos y la tabla anteriores, se observa que:

- Los morteros con arenas tipo A tuvieron una evolución menor que el resto.

- la evolución de las resistencias a compresión fue mayor en los morteros con arena tipo B que en los morteros con arena tipo C, excepto cuando se utilizó aditivo superplastificante, ya que C'3 aumentó su resistencia más de un 50%.

- El desarrollo de las resistencias del mortero de referencia fue superado por los morteros en los que se utilizó aditivo así como por B2 y B3 (con 15% y 25% de arena B respectivamente) debido a una adecuada compactación.

4.4.2 Flexo-tracción

A continuación (tabla 31), se detallan los valores de las resistencias a flexo-tracción obtenidas a 7 y 28 días.

Tabla 31.- Resultados del ensayo de resistencia a flexo-tracción en morteros, en MPa.

	MORTERO	REF (0%)	1 (5%)	2 (15%)	3 (25%)	'3 (25%)
7 días	A	6,39	7,1	6,28	5,7	-
	B	6,39	6,92	6,8	6,49	6,74
	C	6,39	6,43	6,7	6,46	6,54
28 días	A	6,63	6,52	6,56	6,16	-
	B	6,63	6,91	7,81	6,78	6,95
	C	6,63	6,64	7,83	7,66	7,93

Para hacer un análisis comparativo más exacto, se ha elaborado la figura 51, donde se compara la resistencia a flexo-tracción de todos los morteros en porcentaje respecto a la del mortero de referencia:

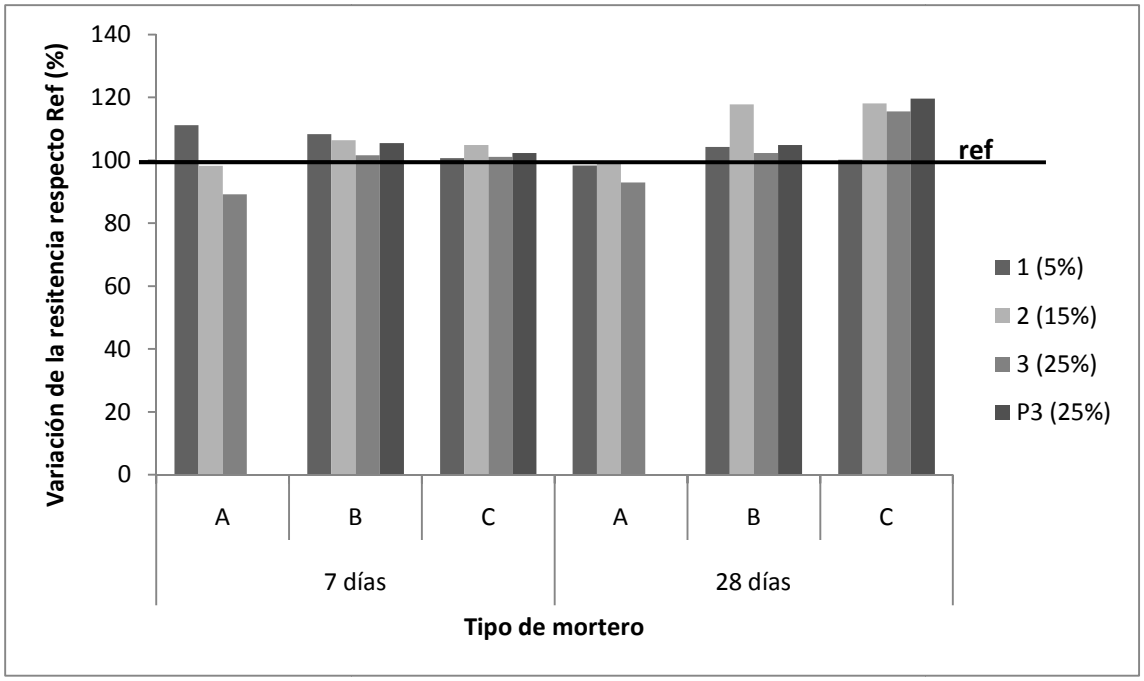


Figura 51.- Resistencia a flexo-tracción de morteros en %, respecto REF

Para los morteros tipo A:

- La resistencia a flexo-tracción disminuyó a medida que se aumentó el contenido de arena de dragado marino.

- Todos los morteros fabricados con arena tipo A (excepto A1 a los 7 días de curado) obtuvieron resistencias inferiores al mortero de referencia. Esto fue debido a que la compactación de las arenas tipo A era especialmente difícil, empeorando a medida que aumentaba el contenido de arena marina en sustitución de arena de cantera.

Para los morteros tipo B y C:

- A 7 días de curado, todos los morteros obtuvieron una resistencia similar y un poco superior al mortero de referencia.

- Al añadir el aditivo, se produjo un ligero aumento de la resistencia.

- Las resistencias aumentaron significativamente en C2, C3 y C'3 a los 28 días de curado, mientras C1 obtuvo una resistencia muy similar.

- A 28 días de curado, todos los morteros obtuvieron resistencias superiores al mortero de referencia. Los morteros fabricados con arena marina tipo C obtuvieron las mayores resistencias.

Para poder apreciar la variación de resistencias desde otra perspectiva, se han elaborado las figuras 52, 53 y 54, donde se puede ver la evolución de la resistencia a flexo-tracción

con el paso del tiempo, de los 7 a los 28 días de maduración, interpolando las resistencias intermedias a partir de estos dos puntos.

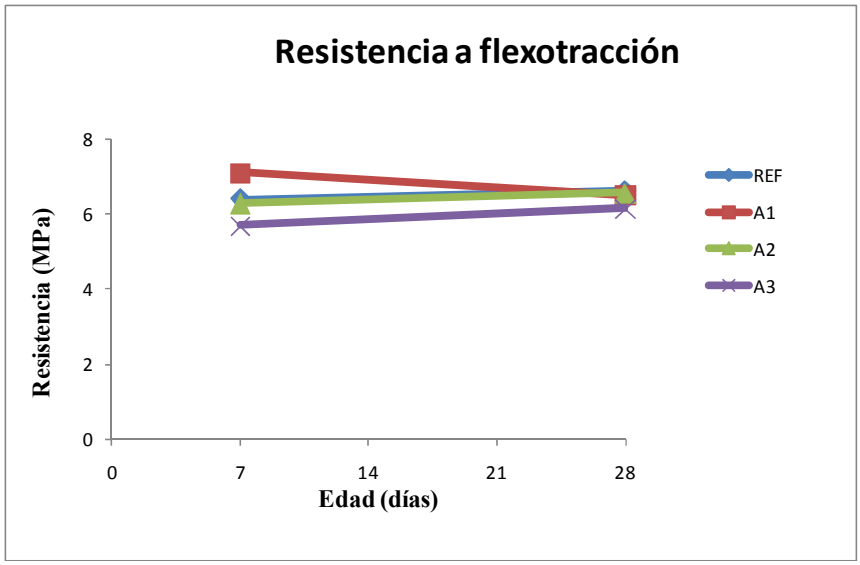


Figura 52.- Evolución de la resistencia a flexo-tracción en morteros. Arena tipo A.

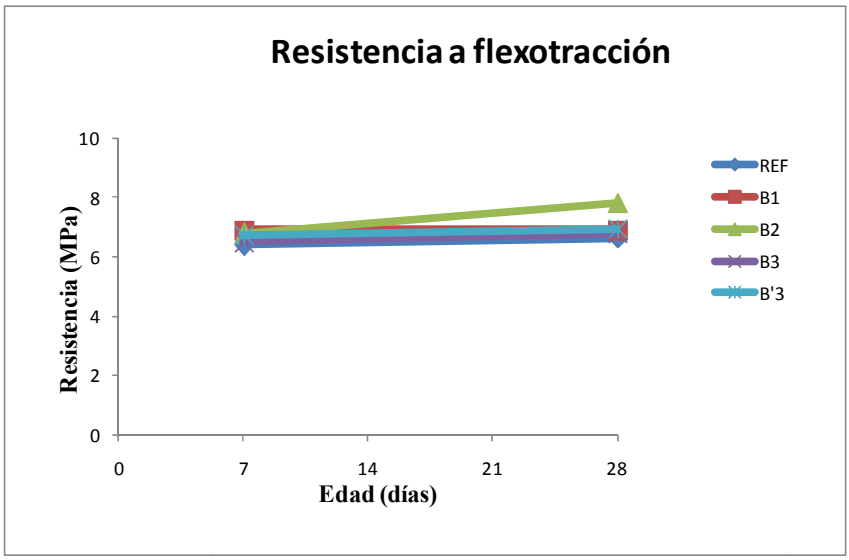


Figura 53.- Evolución de la resistencia a flexo-tracción en morteros. Arena tipo B.

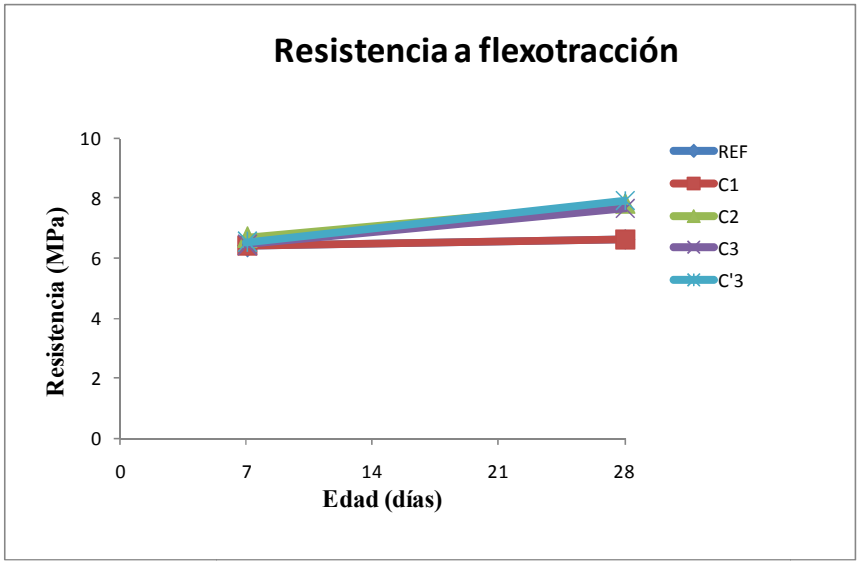


Figura 54.- Evolución de la resistencia a flexo-tracción en morteros. Arena tipo C.

La tabla siguiente muestra para cada mortero la evolución de resistencias a flexo-tracción en porcentaje, respecto la resistencia a 7 días de curado:

Tabla 32.- Evolución de la resistencia a flexo-tracción en morteros, en %

Evolución de las resistencias (%)											
REF	**A1**	**A2**	**A3**	**B1**	**B2**	**B3**	**B'3**	**C1**	**C2**	**C3**	**C'3**
3,8	-8,2	4,5	8,1	-0,1	14,9	4,5	3,1	3,26	16,86	18,57	21,25

Mediante los gráficos y la tabla anteriores, se observa que:

- Los morteros con menor proporción de arena de dragado tuvieron evoluciones negativas de la resistencia (A1 y B1) o muy bajas (C1)

- Los morteros fabricados con 15% y 25% de arena de dragado (C2 y C3) asi como los morteros fabricados con aditivo, tuvieron la mayor evolución de la resistencia.

- Entre los morteros fabricados con arena tipo B, únicamente el mortero tipo B2 obtuvo una gran evolución. Los morteros B1 y B3 tuvieron evoluciones similares al hormigón convencional.

4.5 Resultados y discusión de las propiedades de hormigón endurecido

4.5.1 Densidad, Absorción y Poros Accesibles

Los resultados obtenidos de la realización de los ensayos de densidad, absorción y poros accesibles se indican en la siguiente tabla:

Tabla 33.- Resultados de los ensayos de densidad, absorción y poros accesibles en hormigones

		HC (0%)	35%	50%
Densidad Aparente (gr/cm^3)	**HB**	2,55	2,51	2,46
	HC	2,55	2,53	2,52
Densidad Seca (gr/cm^3)	**HB**	2,37	2,34	2,29
	HC	2,37	2,37	2,34
Densidad Seca Saturada (gr/cm^3)	**HB**	2,44	2,41	2,36
	HC	2,44	2,43	2,41
Absorción (gr/cm^3)	**HB**	3,0	3,0	3,1
	HC	3,0	2,7	3,0
Porosidad (gr/cm^3)	**HB**	7,1	6,9	7,1
	HC	7,1	6,5	7,0

De acuerdo con los resultados, la sustitución de la arena natural 0/5mm por arena procedente de dragado marino, produce una reducción de la densidad en el hormigón.

Tal y como se puede apreciar en la tabla 33, la sustitución de la arena 0/5mm por la arena marina tipo B, apenas modificó la absorción ni los poros accesibles del hormigón endurecido con respecto al hormigón convencional, HC, independientemente del porcentaje de sustitución. Sin embargo, la sustitución de la arena 0/5mm por la arena marina tipo C produjo una reducción de ambas propiedades.

4.5.2 Compresión

A continuación (tabla 34), se detallan los valores de las resistencias a compresión obtenidas a 7 y 28 días para cada tipo de hormigón.

Tabla 34.- Resultados de los ensayos de resistencia a compresión en hormigones, en Mpa

	HORMIGON	HC (0%)	15%	25%	3 5%	50%
7 días	HA	32,51	30,25	-	-	-
	HB	32,51	-	30,15	30,85	37,15
	HC	32,51	-	30,44	30,85	35,45
28 días	HA	34,78	33,52	-	-	-
	HB	34,78	-	34,79	39,77	38,59
	HC	34,78	-	40,75	37,81	39,89

En hormigones tipo A, el porcentaje máximo de sustitución de arena marina por arena de cantera fue 15%, puesto que resultó muy difícil de trabajar y compactar tras añadir la cantidad máxima de aditivo recomendada por el fabricante.

Para hacer un análisis comparativo más exacto, se ha elaborado la figura 55, donde se compara la resistencia a compresión de todos los hormigones en porcentaje respecto a la del hormigón convencional.

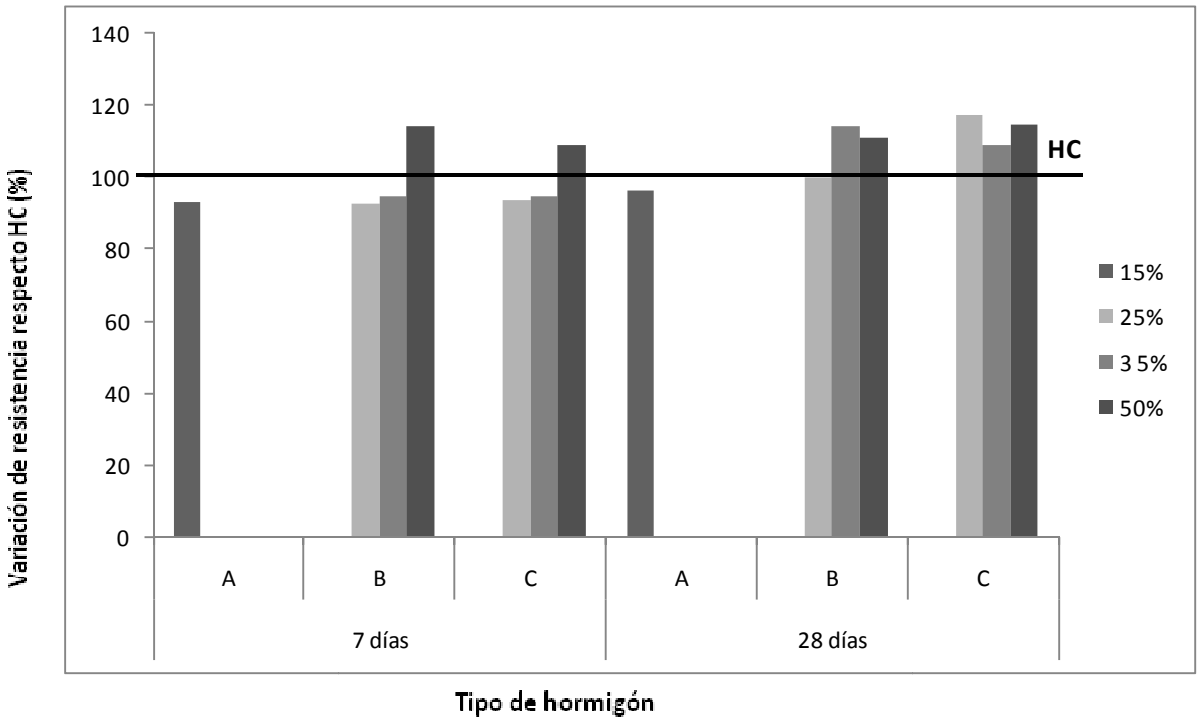


Figura 55.- Resistencia a compresión de hormigones en %, respecto HC

Para los hormigones tipo A:

- El hormigón HA15%, alcanzó resistencias algo inferiores al hormigón convencional a ambas edades de maduración.

Para los hormigones tipo B:

- Los hormigones HB25% y HB35% obtuvieron similares resistencias a 7 días de curado e inferiores al hormigón convencional. El hormigón HB50% alcanzó mayor resistencia que el hormigón convencional a 7 días de curado. A los 28 días, todos los hormigones obtuvieron mayores resistencias que el HC.

Para los hormigones tipo C:

- Los hormigones HC25% y HC35% obtuvieron similares resistencias a 7 días de curado e inferiores al hormigón convencional. El hormigón HC50% alcanzó mayor resistencia que el hormigón convencional a 7 días de curado. A los 28 días, todos los hormigones obtuvieron mayores resistencias que el HC.

En general, podemos decir que para edades de 28 días de curado, cuando el hormigón ya ha desarrollado entorno al 90-95% de su resistencia a compresión, los hormigones fabricados con arenas de dragado tipo B y tipo C tuvieron resistencias superiores a las del hormigón convencional incluso para un porcentaje de sustitución del 50%.

Para poder apreciar la variación de resistencias desde otra perspectiva, se han elaborado las figuras 56,57 y 58, donde se puede ver la evolución de la resistencia con el paso del tiempo, de los 7 a los 28 días de maduración, interpolando las resistencias intermedias a partir de estos dos puntos:

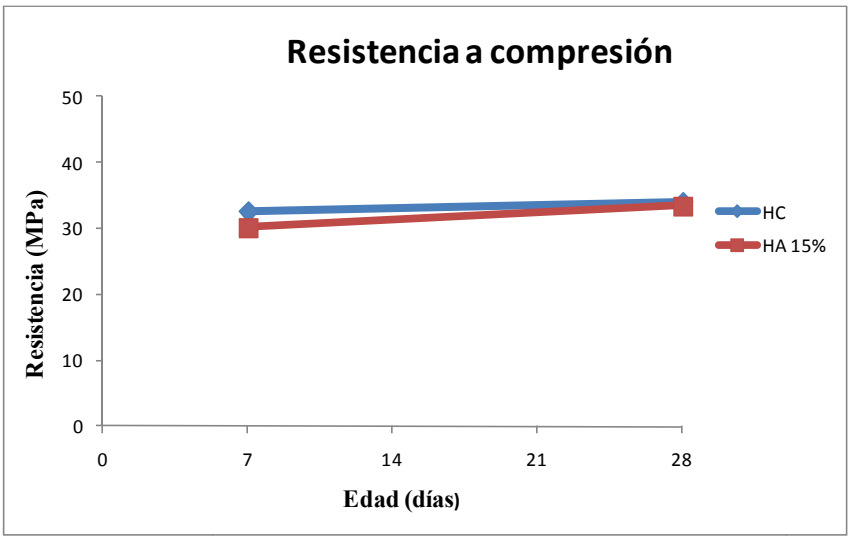


Figura 56.- Evolución de la resistencia a compresión en hormigones. Arena tipo A.

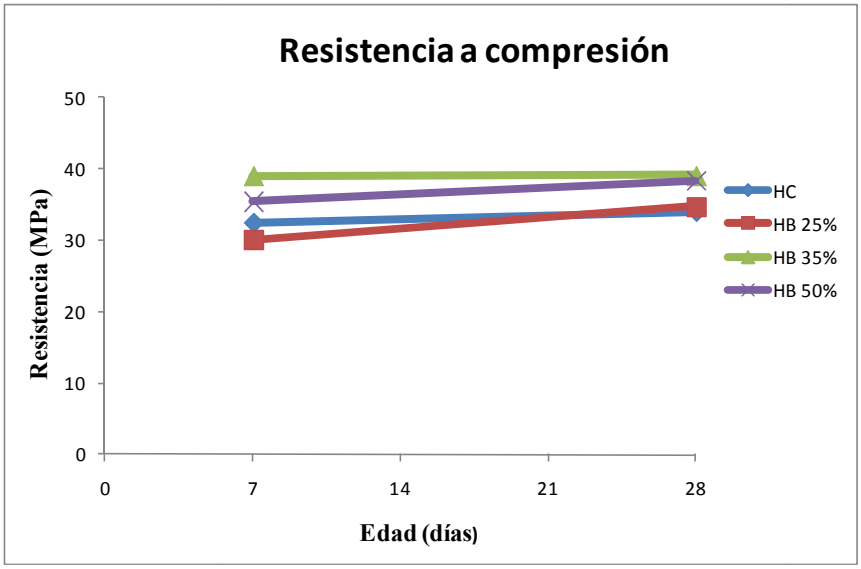


Figura 57.- Evolución de la resistencia a compresión en hormigones. Arena tipo B.

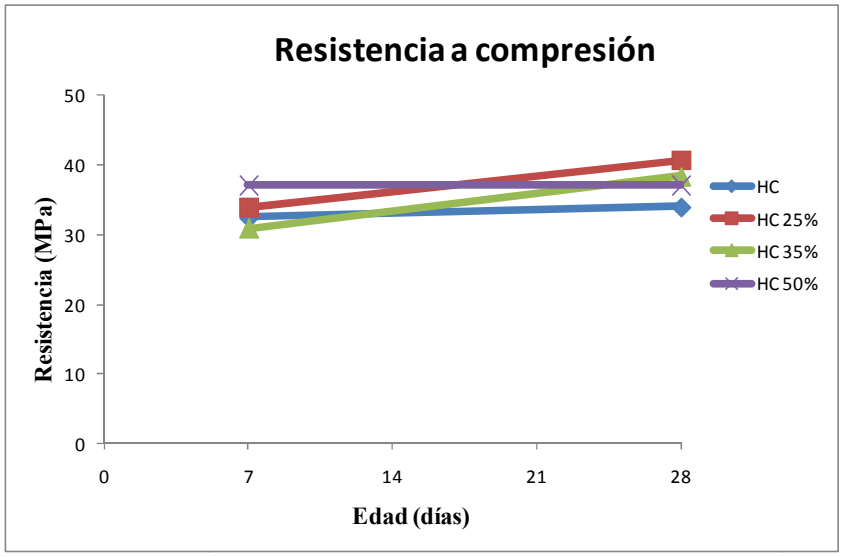


Figura 58.- Evolución de la resistencia a compresión en hormigones. Arena tipo C.

La tabla siguiente muestra para cada hormigón la evolución de resistencias a compresión en porcentaje, respecto la resistencia a 7 días de curado:

Tabla 35.- Evolución de la resistencia a compresión en morteros, en %

Evolución de las resistencias (%)							
HC(0%)	HA15%	HB25%	HB35%	HB50%	HC25%	HC35%	HC50%
7,0	10,8	15,4	28,9	3,9	33,9	22,6	12,5

Mediante las gráficas y la tabla anterior, se observa que:

- En los hormigones fabricados con arena de dragado tipo B el desarrollo de la resistencia de 7 a 28 días, era mayor con el aumento del contenido de arena marina hasta llegar al 35%, a partir de entonces, la evolución de la resistencia disminuía.

- En los hormigones fabricados con arena de dragado tipo C el desarrollo de la resistencia disminuía a medida que aumentaba el porcentaje de arena marina.

- Todos los hormigones fabricados con parte de arena marina presentaron una evolución superior al hormigón convencional, excepto el HB50%.

En el estudio llevado a cabo Millrath et al. **[22]** sobre morteros fabricados con sustituciones de arena natural por arena de dragado marino, se comprobó que el incremento de resistencia con el paso del tiempo era superior que en los que solo contenían áridos naturales, como ocurre en el caso que nos ocupa para la mayoría de los hormigones analizados.

4.5.3 Flexo-tracción

A continuación (tabla 36), se detallan los valores de las resistencias a flexo-tracción obtenidos a 28 días:

Tabla 36.- Resultados de los ensayos de resistencia a flexo-tracción en hormigones, en MPa

	HORMIGON	HC (0%)	15%	25%	3 5%	50%
28 días	HA	5,01	4,27	-	-	-
	HB	5,01	-	5,72	5,46	5,1
	HC	5,01	-	4,65	4,88	5,2

Según la EHE, la resistencia mínima a flexo-tracción de los hormigones para pavimentos portuarios ha de ser de 4 MPa, tal y como se puede ver en los resultados obtenidos, todos los hormigones cumplían este requisito.

Para hacer un análisis comparativo más exacto, ha elaborado la figura 59, donde se compara la resistencia a flexo-tracción de todos los hormigones en porcentaje respecto a la del hormigón convencional.

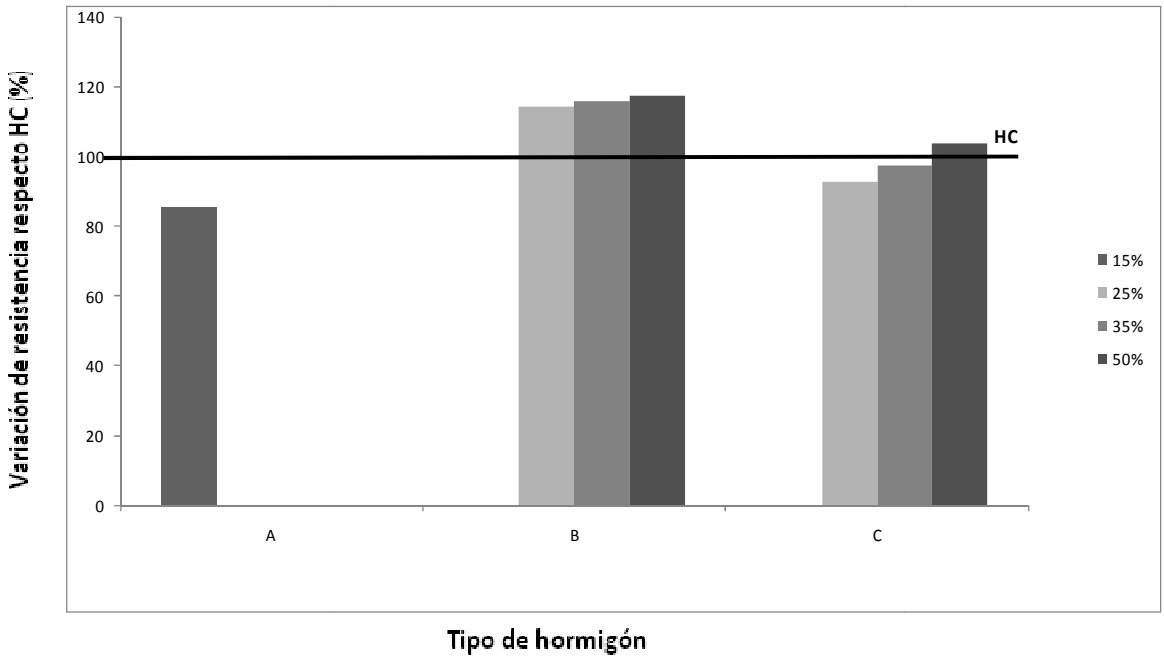


Figura 59.- Resistencia a flexo-tracción de hormigones en % respecto HC

Para el hormigón tipo A:

- La resistencia a flexo-tracción alcanzada por HA15% era un 15% menor que la del hormigón convencional.

Para los hormigones tipo B:

- Todos los hormigones obtuvieron resistencias muy similares. A mayor porcentaje de arena de dragado utilizado en la producción del hormigón, se produjo un ligero aumento de la resistencia.

- Todos los hormigones obtuvieron resistencias considerablemente más elevadas que el hormigón convencional.

Para los hormigones tipo C:

- La resistencia del los hormigones aumentó a medida que se incrementó el porcentaje de arena marina utilizada en sustitución a la arena natural de cantera.

- El hormigón HC50% obtuvo resistencias superiores al hormigón convencional. Los hormigones HC25% y HC35% obtuvieron resistencias menores a HC.

Tras el análisis de los resultados se puede decir que las mayores resistencias a flexo-tracción fueron las alcanzadas por los hormigones tipo B, seguidas por los hormigones tipo C y por último, el hormigón que presentó unos resultados más bajos es el HA15%.

4.5.4 Tracción indirecta (ensayo brasileño)

El ensayo de tracción indirecta se realizó a una edad de 28 días. A continuación (tabla 37), se detallan los valores de las resistencias obtenidos para cada tipo de hormigón:

Tabla 37.- Resultados de los ensayos de resistencia a tracción indirecta en hormigones

HORMIGON	HC (0%)	3 5%	50%
HB	3,21	3,47	3,43
HC	3,21	3,08	2,95

Para hacer un análisis comparativo más exacto, se ha elaborado la figura 60, donde se compara la resistencia a tracción indirecta de todos los hormigones en porcentaje respecto a la del hormigón convencional.

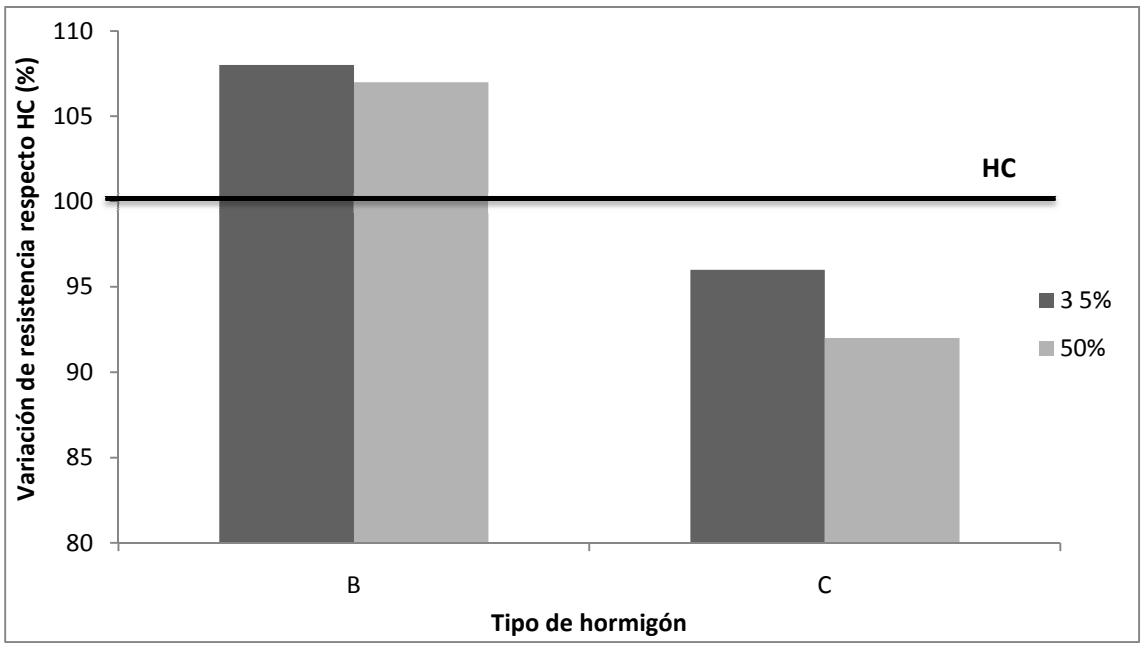


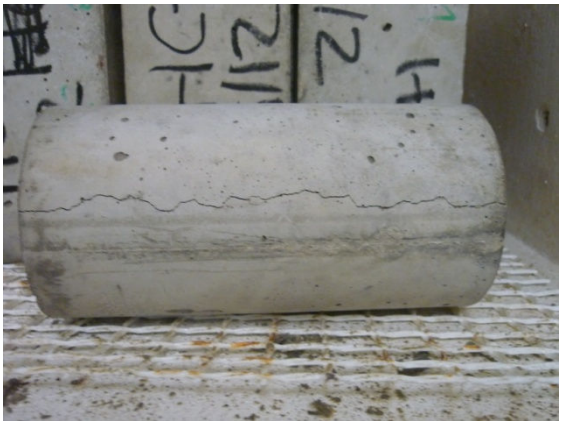
Figura 60.- Resistencia a tracción indirecta de hormigones en % respecto HC

A la vista de los resultados, se observa que los hormigones tipo B, alcanzaron resistencias muy similares, independientemente del porcentaje de arena marina utilizada. Por otro lado, en los hormigones tipo C la resistencia disminuyó a medida que se aumentó dicho porcentaje. La resistencia alcanzada por el hormigón convencional fue superada en aproximadamente un 7 % por los hormigones tipo B, mientras que los hormigones tipo C presentaron unas resistencias entre un 5 y un 7% menores que HC.

Si se comparan las resistencias obtenidas a tracción indirecta con las que se han obtenido a compresión, tenemos que para el hormigón convencional y los hormigones

tipo B, la resistencia a tracción estuvo en torno al 9% de la de compresión, mientras que para los hormigones tipo C está algo inferior, entre el 7,4-8%.

En las figuras siguientes podemos observar el estado de la probeta tras la realización del ensayo. En ellas se aprecia la rotura diametral que se produce en la probeta.



Figuras 61, 62.- Probeta cilíndrica tras el ensayo de tracción indirecta

4.5.5. Succión capilar

El ensayo de succión capilar se realizó a una edad de 28 días. A continuación (tabla 38), se detallan los valores resultados obtenidos para cada tipo de hormigón:

Tabla 38.- Resultados de los ensayos de succión capilar en hormigones

	Succión capilar [mm/min^(1/2)]				
	HC	**HB35%**	**HB50%**	**HC35%**	**HC50%**
10 '	0,075	0,073	0,068	0,051	0,062
30 '	0,066	0,061	0,060	0,045	0,055
60 '	0,063	0,060	0,058	0,046	0,055
120 '	0,061	0,060	0,058	0,047	0,057
6 h.	0,056	0,059	0,058	0,047	0,060
24 h.	0,046	0,054	0,053	0,044	0,060
48 h.	0,041	0,052	0,051	0,040	0,056
72 h.	0,055	0,072	0,070	0,054	0,077

Para obtener el coeficiente de succión de cada tipo de hormigón, se utilizaron los datos de succión relativos a las primeras dos horas de exposición de las probetas al agua. En la figura 63 se representa el volumen de agua absorbida por unidad de superficie frente a la raíz cuadrada del tiempo. A partir de esta figura se obtuvo una línea de tendencia polinómica de grado uno para cada tipo de hormigón, siendo la pendiente de la misma el coeficiente de succión determinado.

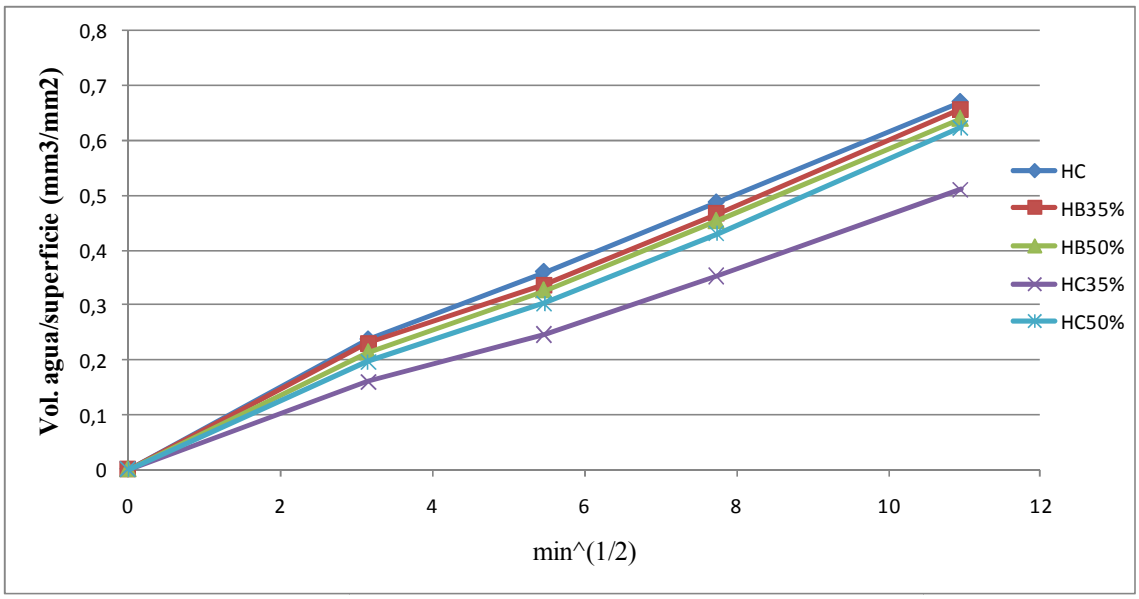


Figura 63.- Succión capilar

Se observa como la pendiente de todas las rectas es superior al inicio del proceso. Ello se debe a la saturación que se produce en los poros de las probetas expuestas al agua con el paso del tiempo.

Las líneas de tendencia y los coeficientes de succión determinados para cada tipo de hormigón se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 39.- Líneas de tendencia y coeficientes de succión

HORMIGÓN	LINEA DE TENDENCIA	COEF. DE SUCCIÓN
HC	$y = 0{,}0602x + 0{,}0218$	0,0602
HB35%	$y = 0{,}0582x + 0{,}0171$	0,0582
HB50%	$y = 0{,}0578x + 0{,}0123$	0,0578
HC35%	$y = 0{,}0459x + 0{,}0031$	0,0459
HC50%	$y = 0{,}056x + 0{,}0045$	0,0560

A la vista de los resultados de la gráfica se puede observar lo siguiente:

- Todos los hormigones presentaron una evolución de la succión muy similar durante el ensayo.
- El hormigón HC35% obtuvo el coeficiente de succión más baja con una diferencia de 0,01 respecto del siguiente, HC50%.
- Los hormigones fabricados con arena tipo B tuvieron una succión prácticamente idéntica y muy similar a la del hormigón convencional, como ocurrió en el ensayo de porosidad accesible.

- El hormigón convencional es el que presentó una succión más alta, a pesar de que la única diferencia significativa de succión que se observó fue al compararlo con el HC35%.

En las figuras siguientes podemos observar las probetas, con su zona inferior impermeabilizada y una vez están siendo ensayadas:

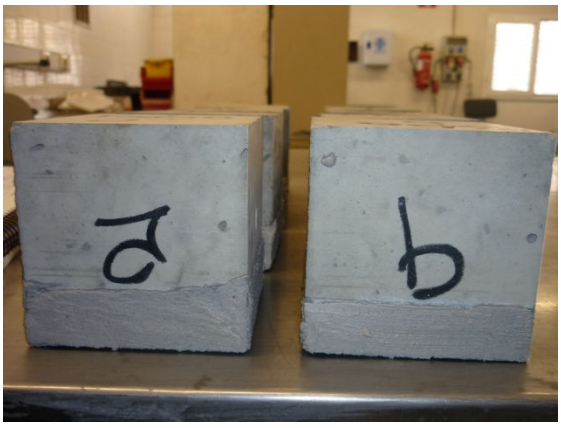


Figura 64.- Probetas con la zona inferior inmpermeabilizada para ensayo de succión

Figura 65. Probetas durante el ensayo de succión capilar.

4.5.6 Penetración de agua bajo presión

Los ensayos de penetración de agua bajo presión, se realizaron a una edad de 28 días. Con objeto de valorar la dispersión que el ensayo podía presentar, se utilizaron 3 probetas de cada uno de los tipos de hormigón. Tras la rotura mediante ensayo brasileño, se realizaron las lecturas de la penetración de agua. Dichas lecturas se tomaron a equidistancias de 1 cm, siendo un total de 16 lecturas por cada probeta. En la tabla 40 podemos observar las profundidades de penetración media y máxima halladas a partir de 3 probetas de cada tipo de hormigón.

Tabla 40.- Resultados de los ensayos de penetración de agua bajo presión en hormigones.

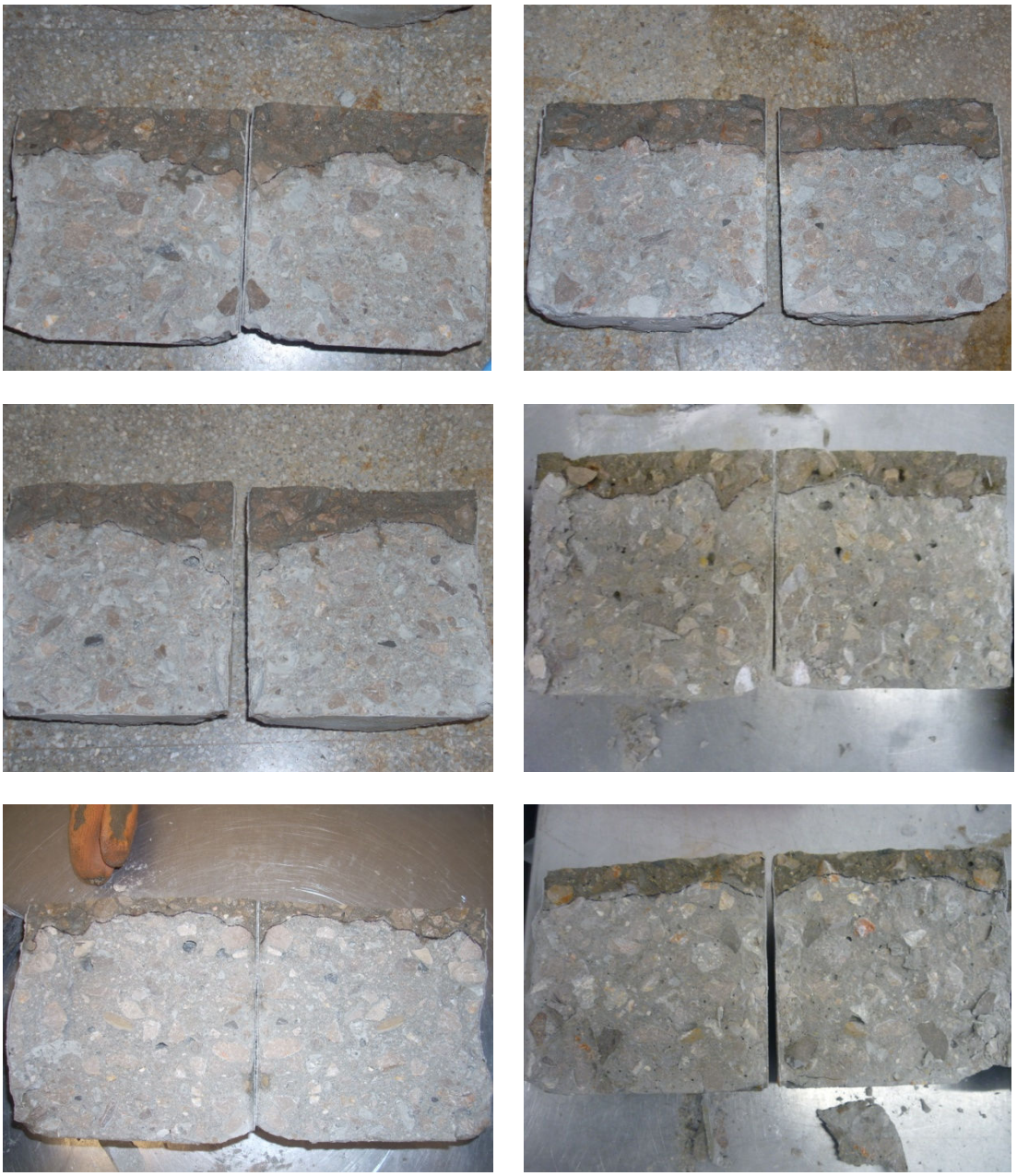
Prof. de penetración (cm)	HC(0%)	HB35%	HB50%	HC35%	HC50%
Media	2,7	1,8	1,9	1,5	1,9
Máxima	3,5	2,1	2,1	2,0	2,2

Según la EHE, la profundidad media límite de penetración de agua bajo presión en el hormigón debe ser de 3 cm, y la profundidad máxima de 5 cm, lo que se cumplió en todos los casos.

A la vista de los resultados, se observa que en hormigones fabricados con parte de arena de dragado, la profundidad de penetración de agua bajo presión aumentó con el contenido de arena marina. No obstante, para HB35%, HB50% y HC50% se obtuvieron unos resultados prácticamente idénticos. El hormigón HC35% obtuvo la menor profundidad de agua, con relativa diferencia respecto al resto.

El hormigón convencional alcanzó profundidades de penetración de agua significativamente superiores al resto de hormigones. Las diferencias entre las profundidades media y máxima para este hormigón fueron las más altas (0,7 centímetros)

A continuación se muestran unas figuras en las que podemos observar la profundidad de penetración de agua tras la finalización del ensayo:



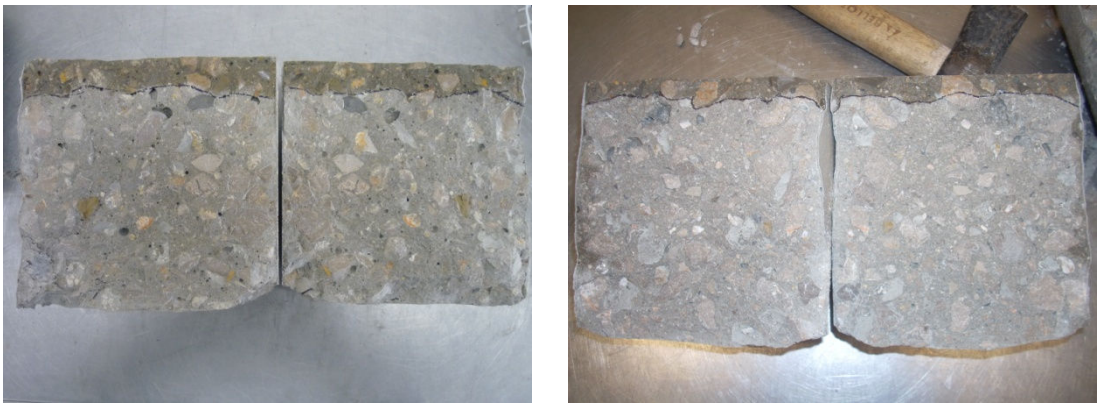


Figura 66.- Aspecto de las probetas tras el ensayo de penetración de agua bajo presión

El deterioro de las estructuras de hormigón, está generalmente causado por la penetración de agentes agresivos externos en su interior. La durabilidad del hormigón está fuertemente relacionada con la calidad de los primeros centímetros de material bajo la superficie (cobertura) **[45].** Tanto porosidad, como penetración de agua bajo presión y succión se consideran índices de durabilidad, puesto que sirven para cuantificar la resistencia del material frente a la penetración de agentes externos, por lo que han sido objeto de diversos estudios **[46,47]** y en todos los casos, se ha encontrado relaciones directas entre estas propiedades, es decir, que si aumenta la porosidad, también lo hacen la penetración de agua bajo presión y la succión capilar. Por tanto, si se relacionan los resultados relativos a estas propiedades, observamos las mismas tendencias:

- Las tres propiedades obtenidas en los hormigones HB35% y HB50% las 3 propiedades fueron muy similares.

- Los hormigones tipo C, presentaron mayor profundidad de penetración, succión capilar, porosidad accesible cuanto mayor es el contenido de arena de dragado marino.

4.5.7 Abrasión

Los ensayos de abrasión, se realizaron a una edad de 28 días. Con objeto de valorar la dispersión que el ensayo podía presentar, se realizaron 6 repeticiones para cada tipo de hormigón. En la siguiente tabla podemos observar la pérdida media de peso en porcentaje para cada tipo de hormigón:

Tabla 41.- Resultados de los ensayos de abrasión en hormigones

	HC(0%)	HB35%	HB50%	HC35%	HC50%
pérdida de partículas (%)	18	16	16	16	15

A la vista de los resultados se observa que la pérdida de partículas tras la realización del ensayo, fue menor en los ensayos que contienen arenas de dragado marino. El hormigón HC50% tuvo la menor pérdida de peso, siendo muy similar a la obtenida por el resto de hormigones con arenas de dragado tipos B y C. El hormigón convencional, tuvo una pérdida en peso superior en un 2-3% a los hormigones anteriores y por tanto, es el que menor resistencia obtuvo al desgaste.

4.5.8 Resistencia al impacto

Los ensayos de resistencia al impacto, se realizaron a una edad de 28 días. Con objeto de valorar la dispersión que el ensayo podía presentar, se realizaron varias repeticiones para cada tipo de hormigón. En la siguiente tabla podemos observar el número de golpes medio hasta la aparición de la primera fisura visible sobre la superficie superior de la muestra, así como el que fue necesario para provocar la rotura de la misma:

Tabla 42.- Resultados de los ensayos de resistencia al impacto en hormigones

		HC(0%)	HB35%	HB50%	HC35%	HC50%
Nº de golpes	**Fisura**	9	20	32	19	20
	Rotura	13	31	36	20	21

Cabe destacar, que se según indica la norma, se desecharon algunos de los resultados obtenidos en diversas probetas al presentar una dispersión muy elevada (superior al 30%). Ello fue atribuido a que algunas de las probetas procedían de cortes de otras de mayor tamaño y presentaban irregularidades en las caras de apoyo, lo que dio lugar a resultados erróneos.

A la vista de los resultados se observa que:

- Los hormigones tipo B obtuvieron una resistencia al impacto más elevada. La resistencia aumentó con el contenido de arena de dragado del hormigón.

- Los hormigones tipo C obtuvieron unas resistencias al impacto muy similares tanto a fisura como a rotura de la muestra.

- El hormigón convencional presentó una resistencia al impacto inferior a cualquiera de los hormigones fabricados con parte de arenas marinas.

Este ensayo se realizó a modo indicativo ya que en principio está indicado para hormigones con fibras.

4.5.9 Velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos (UPV)

El ensayo de evaluación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos se realizó a una edad de 28 días.

Los impulsos ultrasónicos, pasan a lo largo del camino más corto entre los palpadores, rodeando la periferia de los defectos (grietas, coqueras o capas de inferior calidad) en caso de que existan, lo que aumentaría el tiempo de recorrido.

Con objeto de valorar los posibles defectos de fabricación de las probetas, lo que se traduciría en una dispersión de los tiempos de ensayo, se realizaron 3 repeticiones para cada tipo de hormigón, cada una de ellas sobre una probeta diferente, pero fabricadas en la misma amasada. En la tabla 43 podemos observar el tiempo medio de propagación de los impulsos ultrasónicos:

Tabla 43.- Tiempos de propagación de los impulsos ultrasónicos medidos en el ensayo

	Tiempo de propagación (s)				
	HC(0%)	**HB35%**	**HB50%**	**HC35%**	**HC50%**
Tiempo Medio (µs)	41,3	40,8	40,8	42,3	40,7

Como se ha comentado anteriormente, el método de transmisión utilizado fue el directo, con objeto de obtener la máxima intensidad de propagación de los impulsos.

Haciendo los cálculos pertinentes, se obtuvo la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos, que queda resumida en la tabla 44:

Tabla 44.- Resultado de los ensayos UPV en hormigones

	Velocidad de propagación ultrasonidos (UPV)				
	HC(0%)	**HB35%**	**HB50%**	**HC35%**	**HC50%**
Vel. Media (m/s)	4842,6	4908,3	4902,0	4733,7	4910,2

A la vista de los resultados obtenidos se observa que:

- La velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos para HC35% fue la menor de todos los tipos de hormigón estudiados.

- Los hormigones tipo C obtuvieron una mayor UPV conforme mayor era el contenido de arena de dragado en sustitución por arena de cantera, mientras que en los hormigones B apenas hubo variación con el procentaje de arena de dragado utilizado.

- Los hormigones HB35%, HB50% y HC50% alcanzaron velocidades de propagación de los impulsos muy similares, y superiores a las alcanzadas en el hormigón convencional.

Algunas velocidades UPV propuestas por Whitehurst **[41]** para hormigón con una densidad de aproximadamente 2400 kg/m^3 consideradas como excelentes, buenas, dudosas, pobres y muy pobres son 4500, 3500-4500, 3000-3500, 2000-3000 y menos de 2000 m/s respectivamente. De acuerdo con Jones y Gatfield **[42]** el valor más bajo para una calidad buena del hormigón es 4100-4700m/s. Según estos datos, todos los hormigones estudiados tienen una calidad excelente.

Por otro lado, se han realizado varios estudios intentando buscar una relación directa entre UPV y resistencia a compresión del hormigón:

En 1990, K. Tharmaratram et al. **[43]** llevaron a cabo un estudio basado en análisis de resultados experimentales del que obtuvieron una relación exponencial entre ambas propiedades:

$$f_c = a \cdot e^{bV_c} \qquad (8)$$

Pero teniendo en cuenta la heterogénea naturaleza del hormigón, Ramazan Demirboga et al. **[44]** estudiaron la aplicación de la ecuación anterior en hormigones con adicciones minerales en sustitución de diferentes cantidades de cemento, y llegaron a la conclusión de que para cada tipo de adicción y cada porcentaje de sustitución era necesario hacer un ajuste de la ecuación anterior, hallando las constantes a y b. Dicho ajuste se realiza a partir de la medición de la UPV y la resistencia a compresión a distintas edades de curado.

En nuestro caso, únicamente se hicieron mediciones de la UPV a 28 días de curado, por tanto, no es posible hacer un desarrollo de la evolución de la UPV con la resistencia a compresión para cada tipo de hormigón.

Sin embargo, las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los áridos marinos tipos B y C eran similares y a la vista de los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y UPV a 28 días de curado (ver tablas 32 y 40), se puede decir que se cumple que a mayor resistencia a compresión, mayor velocidad UPV, quedando ordenados de mayor a menor en ambos ensayos de la siguiente forma: HC50%, HB35%, HB50% y HC35%. El hormigón convencional, presentó una UPV superior al del HC35% y una resistencia a compresión menor, pero como ya se ha apuntado, no serían directamente comparables en cuanto que están hechos con arenas diferentes en parte.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

5.1 Introducción

Después de todo lo expuesto hasta el momento, en el presente capítulo se pretende recoger las conclusiones extraídas de todo el trabajo realizado. Dichas conclusiones se exponen a continuación de forma clara y diferenciada.
A su vez, también se exponen las futuras líneas de investigación que se han creído convenientes para el estudio más exhaustivo del uso de arenas de dragado marino en fabricación de morteros y hormigones.

5.2 Conclusiones:

Áridos:

- La composición mayoritaria de las arenas de dragado procedentes del puerto de Barcelona es cuarzo.

- Todas las arenas excedieron el contenido máximo permitido de cloruros. Todas ellas requerirían un tratamiento previo a su utilización con objeto de disminuir dicha proporción de cloruros en caso de utilizarlas en un 100% de sustitución de la arena natural. Una sustitución parcial será necesaria para poder ser utlizadas sin lavar como áridos en el hormigón.

- Todas las muestras cumplen las especificaciones técnicas respecto al contenido de sulfatos, materia orgánica y metales pesados.

- Las arenas de dragado utilizadas fueron considerablemente más finas que la arena de cantera 0/5mm. La arena tipo A tuvo un 50% de finos, mientras que las arenas tipo B y C entre un 15% y un 20%. Las densidades y absorciones de las

arenas de dragado marino son un poco inferiores respecto a las de la arena de cantera.

- Las arenas tipo C tienen una densidad algo mayor y una absorción menor que las arenas tipo B. El % de sulfatos también es algo más elevado en las C.

Morteros y hormigones frescos:

- Todos los morteros y hormigones fabricados (incluyéndose los convencionales) presentaron la consistencia seca requerida. Sin embargo, los materiales fabricados con arenas de dragado necesitaron mayor cantidad de superplastificante.

- Los morteros y hormigones en los que intervino arena de dragado marino de mayor finura (tipo A), fueron los menos trabajables, así como los que presentan una mayor dificultad de compactación.

- Los morteros y hormigones con arenas de dragado marino tipos B y C, presentan una trabajabilidad y unas posibilidades de compactación aceptables, que van disminuyendo a medida que aumentamos el contenido de éstas arenas hasta un máximo de 50%.

Morteros y hormigones endurecidos a 28 dias:

En primer lugar, se concluye que las arenas de dragado con alto contenido de finos (tipo A) no resultan adecuadas para la fabricación de morteros y hormigones debido a sus bajas posibilidades de compactación y trabajabilidad y a su menor resistencia a compresión y flexo-tracción si la comparamos con las arenas de dragado B y C.

- Morteros:

- Los morteros fabricados con parte de arenas B y C mejoraron las resistencias a compresión y flexo-tracción respecto las del hormigón convencional en todos los casos.

- Los morteros tipo B presentaron las mejores resistencias a compresión. A mayor contenido de arena de dragado utilizado se obtiene mayor resistencia.

- Los morteros con incorporación de superplastificante mejoraron considerablemente las resistencias a compresión y ligeramente las resistencias a flexo-tracción, probablemente debido a una mejora de la trabajabilidad y la compactación del hormigón fresco.

- Los morteros fabricados con arenas de dragado tipo B y aquellos en los cuales se incorporó el superplastificante obtuvieron mayor evolución de la resistencia a compresión de 7 a 28 días.

- Los morteros fabricados con arenas tipo C obtuvieron mayor evolución de la resistencia a flexo-tracción de 7 a 28 días.

➢ Hormigones:

- Las sustitución de arena 0/5mm por arena marina, produce una reducción de la densidad en el hormigón.

- La absorción y los poros accesibles de los hormigones fabricados con arenas de dragado (en sustitución parcial a la arena de cantera) es igual o inferior, pero en ningún caso superior a la del hormigón convencional.

- Todos los hormigones fabricados con arenas marinas, mejoran las resistencias a compresión respecto la del hormigón convencional.

- La evolución de la resistencia a compresión de 7 a 28 días de curado en los hormigones fabricados con parte de arena de dragado, es superior a la del hormigón convencional, excepto para HB50%.

- Todos los hormigones fabricados con arenas de dragado consiguen la mínima resistencia a flexo-tracción requerida (4MPa) para ser utilizados como pavimentos portuarios. Los hormigones fabricados con arena tipo B obtuvieron las mayores resistencias.

- Los hormigones fabricados con arenas de dragado tipo B y C (arenas con una cantidad de finos no superior al 20%) obtienen mayores resistencias a impacto que el hormigón convencional.

- Los hormigones fabricados con arenas de dragado obitnene resistencias al desgaste superiores al hormigón convencional.

- El coeficiente de succión de los hormigones fabricados con arena de dragado es inferior al del hormigón convencional, lo que puede explicarse por la mayor cantidad de material fino en estos hormigones, que rellenarían mejor los poros existentes en las muestras.

- De la misma manera, la penetración de agua bajo presión de los hormigones fabricados con arena de dragado es inferior al hormigón convencional. En el caso de los hormigones tipo B tanto succión, como profundidad de agua bajo

presión permanecen prácticamente constantes, como ocurría con la porosidad accesible, independientemente del contenido de arena de dragado utilizado, mientras que en los hormigones tipo C, las 3 propiedades aumentan con el contenido de arena de dragado.

- Todos los hormigones presentan una UPV relativamente alta a 28 días, lo que según diversos autores indicaría una calidad buena del hormigón. Comparando nuestros resultados para los hormigones de dragado marino con estudios a cerca de la relación existente entre la resistencia la UPV y la resistencia a compresión, se puede decir que las velocidades más elevadas corresponden a los hormigones más resistentes, verificando el comportamiento adecuado de estos materiales.

Con todos los ensayos llevados a cabo, se puede destacar el adecuado comportamiento de los morteros y hormigones fabricados con arenas de dragado marino tipos B y C a 28 días de curado (arenas de dragado con una cantidad de fino no superior al 20%). En los ensayos sobre morteros tanto un tipo como otro mejoran el comportamiento del hormigón convencional, mientras que en los ensayos sobre hormigones, si bien los tipo B mejoran todas las propiedades estudiadas respecto al convencional, los tipo C presentan menores resistencias en los ensayos a tracción.

5.3 Futuras líneas de investigación

Algunos aspectos interesantes a tratar en futuras investigaciones sobre la utilización de arenas de dragado marino en la fabricación de morteros y hormigones serían los siguientes:

- Estudiar la retracción a largo plazo.
- Estudiar el comportamiento a ciclos hielo/deshielo.
- Estudiar la profundidad de penetración del ión cloruro.
- Estudiar la resistencia al impacto con la incorporación de fibras en el hormigón.
- Estudiar la relación existente entre la UPV e índices de durabilidad como la permeabilidad, succión capilar y porosidad. Dicho estudio sería preferible realizarlo sobre mortero, ya que al no existir árido grueso la forma y tamaño de los poros sería más homogénea en toda la muestra.
- Estudiar la relación existente entre la UPV y la resistencia a compresión a diferentes edades de maduración para un mismo hormigón y con diferentes relaciones a/c.

Referencias Bibliográficas

Normas

UNE EN 933-2:1996	Granulometría
PrEN 1097-6:2000 ASTM C642-97	Densidad y absorción de los áridos
UNE 83.131:90	Equivalente de arena del árido grueso
UNE 7.238:71	Coeficiente de forma del árido grueso
UNE EN 1097-2:99 UNE-EN 12697-17:2006+A1	Desgaste de Los Ángeles
UNE EN 1744-1:1999	Contenido de cloruros, sulfatos y materia orgánica
UNE 83-313-90	Consistencia del hormigón en fresco.
UNE EN 12390-3	Resistencia a compresión.
UNE 83509 UNE EN 14651	Resistencia a flexo-tracción
UNE 83-306-85	Tracción indirecta
UNE-EN 1230:8-2001	Profundidad de penetración de agua bajo presión
UNE-EN 83514	Resistencia al impacto
UNE 83-308-86	Velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos

Referencias

[1] British Marine Aggregate Producers Association, 2002.

[2] Llorca Ortega, J. Los dragados y su importancia en la ingeniería. Conferencia 15.1. Curso general de dragados. Puertos del Estado, 1997.

[3] Vidal Martín, R; Paris Solas, C. Equipos de dragado. Conferencia 6. Curso general de dragados. Puertos del Estado, 1997.

[4] Ortego Valencia, Laia. Técnicas de dragado en ingeniería marítima. Tesina de especialidad. ETSECCPB – UPC, 2003.

[5] Ports and Dredging, nº 157, IHC Parts & Services. Keeping dredging hardware profitably at work. IHC. Holland.

[6] Sanz Bermejo, C. Manual de equipos de dragado. Madrid, 2001.

[7] ICES (International Council for the Exploration of the Sea). WGEXT (Report of the Working Group on the Effects of Extraction of Marine Sediments on the Marine Ecosystem). Helsinki, Finland, 2007.

[8] Convention for the protection of the marine environment of the North-East Atlantic. OSPAR Convention, 1992.

[9] Convention for the protection of the marine environment of the Baltic Sea Area. HELCOM Convention, Helsinki, 1992.

[10] Utilización del Dominio Público Marítimo terrestre. Sección 3. Extracción de Áridos y Dragados. Artículo 63. Ministerio de Medio Ambiente.

[11] US EPA, US ACE, US DOE-BNL. Fast Tracks Dredged Material Decontamination Demostration for the Port of New York and New Jersey. Sprignfield, VA, 1999.

[12] Millrath K., Kozlova S., Meyer C., Shimanovich S. New Approach to Treating the Soft Clay/Silt Fraction of Dredged Material, 2002.

[13] Dubois V. et al. The Use of Marine Sediments as a Pavement Base Material, 2008.

[14] Zentar R., Dubois V., Abriak N.E. Physical and Mechanical Behaviour of Dredged Marine Sediments, 2005.

[15] Gutt W.; Collins R. J. Sea Dredged Aggregates in Concrete. Ed Building Research Establishment Press, 1987.

[16] Pontes, Miquel. http://www.marenostrum.org.

[17] Girón Vargas, H. A. Ataque por Cloruros en el Concreto, 1998.

[18] IDAC, International Asociation of Dredging Companies. Dredging: The Facts.

[19] Guerra, Andrés. Caracterización y Gestión de Sedimentos de Dragado Portuarios. Calidad Ambiental. Puertos del Estado.

[20] Agostini, F.; Skoczylas, F. and Lafhaj, Z. About a Possible Valorisation in Cementitious Materials of Polluted Sediments after Treatment, 2007.

[21] Limeira, J.; Agulló, L.; Etxeberria, M. Fine Dredged Marine Sand on Mortars, 2009.

[22] Millrath, K.; Kozlova, S.; Shimanovich, S. and Meyer, C. Beneficial Use of Dredge Material (1 and 2), 2001.

[23] Bravo, E.F; Cornejo A.E. Material: Cemento.

[24] Neville, A.M. Properties of Concrete, 1996.

[25] Tsurusaki, K.; Iwasaki, T.; Arita, M. Seabed Sand Mining in Japan, 1988.

[26] Mahmoud Abdelkader, S.; Moragues Terrades, A.; Reyes Pozo, e. Influencia de la estructura porosa de hormigones utilizados en ambientes marions frente al transporte generado por gradiente de presión.

[27] EHE. Instrucción del Hormigón Estructural. Capítulo 6. Apartado 28.

[28] Dubois, V. characterisation physico-mécanique et environnementale des sédiments marins. Application en technique routière (physical, mechanical and environmental characterization of marine sediments application to road techniques). Thesis, Ecole des Mines of Douai, France. 2006.

[29] Serna, P. 2006.

[30] http://www.bsigroup.com

[31] Chapman, G.P.; Roeder, A.R. The effect of sea-shells in concrete aggregates, 1970.

[32] British Marine Aggregate Producers Association (BMAPA). Aggregates from the Sea.

[33] Concrete Society Working Party. Alkali-silia Reaction: Minimising the risk of damage. Guidance notes and model especification clauses.

[34] CEDEX Recomendacines para la gestión del material de dragado en los puertos Españoles. 1994.

[35] Crossfall Highways, Croydon, England, 1987

[36] Maher, A.; Douglas, W.S.; Jafari, F. Field placement and evaluation of stabilized dredged material (SDM) for the New York/New Jersey Harbour. Marine georesources and geotechnology, 2006.

[37] Herber C. Sydney airport's parallel runway. The beneficial use o sand dredged in Botany Bay. World dredging congress, Australia.

[38] http://www.wikipedia.org/wiki/Islas-Palm

[39] CEDEX. Formas de gestión del material dragado. Situación en España. Centro de estudios de puertos y costas.

[40] Glenium C 355, BASF, The Chemical Company.

[41] E.A. Whitehurst, Soniscope tests concrete structures, J. Am. Concr. Inst. 47 (1951 Feb.) 443– 444.

[42] R. Jones, E.N. Gatfield, Testing concrete by an ultrasonic pulse technique, DSIR Road Research Tech. Paper No. 34 (London, H.M.S.O., 1955).

[43] K. Tharmaratnam, B.S. Tan, Attenuation of ultrasonic pulse in cement mortar, Cem. Concr. Res. 20 (1990) 335– 345.

[44] Ramazan Demirboga, Ibrahim Turkmen, Mehmet B. Karakoç, 2004 April.

[45] D. Breysse, B. Gerard, Modelling of permeability in cement-based materials: Part 1. Uncracked medium, Cement and Concrete Research.

[46] C. Gonilho Pereira et al. Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete, 2008.

[47] Luzija Hanzic et al. Capillary absorption in concrete and the Lucas–Washburn equation, 2009.