

## **BLOQUE II: TRABAJO EXPERIMENTAL**

## 2. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS

### 2.1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL CAPÍTULO

El objetivo de este capítulo es definir las características fundamentales de cada uno de los componentes que formarán parte del hormigón que obtendremos. De los materiales que hemos utilizado para elaborar la tesina se han estudiado sus características más importantes de cara a tener unos parámetros que los definan. Se ha prestado una mayor atención, en cuanto a su caracterización, al fango ya que es la adición no habitual del hormigón y el objeto del estudio. Para ello se han analizado otras características además de los parámetros físicos, que son los más habituales.

Como en toda caracterización de materiales o componentes, seguiremos una serie de normas, métodos y técnicas analíticas. Por esta razón, según se presenten los datos obtenidos en este capítulo también se adjuntarán las normas que se han seguido para obtenerlos.

Los componentes formadores del hormigón son:

- Fangos de depuradora de aguas residuales.
- Áridos: arena fina, arena gruesa, gravilla y grava.
- Cemento Portland.
- Aditivos.
- Agua.

Llegados a este punto pasamos a analizar los materiales introducidos con anterioridad en los siguientes apartados.

### 2.2. FANGO

#### 2.2.1. Origen

El fango biológico seco utilizado procede de la depuradora de aguas residuales de Sabadell-Riu Sec (ver *figura 2.1*). El secado se ha llevado a cabo durante una hora a 200 °C, cosa que hace que no sea un secado muy fiable. Quedan grumos con partes interiores húmedas y que tienen aproximadamente un 15 % de humedad.

Se han caracterizado los siguientes parámetros:

- Caracterización física: humedad, densidad y granulometría.
- Caracterización química: pH, porcentaje de la materia orgánica, elementos mayoritarios, lixiviación DIN 38414-S4 [9].
- Caracterización mineralógica: Para determinar la composición mineralógica del fango (fracción inorgánica-cristalina) se ha realizado el análisis de difracción de rayos X [10] del fango sin tamizar.

Fig 2.1: Aspecto del fango seco de Sabadell.



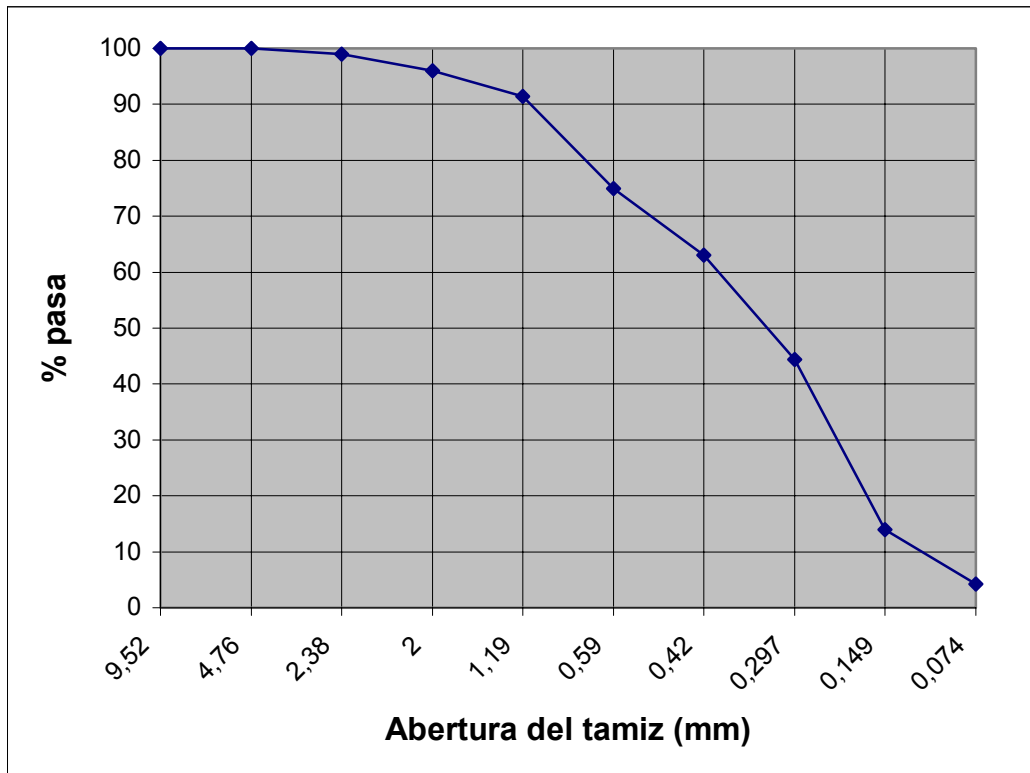
### 2.2.2. Caracterización física

El fango, en este trabajo, se plantea como una adición del hormigón, por eso es conveniente hacer una caracterización de su fracción granulométrica, ver *tabla 2.2.* y *gráfica 2.3.* El lodo inicialmente presenta una humedad del orden del 15%. Cabe comentar que esta granulometría se realizó con el fango totalmente seco.

Tabla 2.2: Análisis granulométrico del fango.

TAMIZ (MM)	% PASA
4,76	100
2,38	99
2	96
1,19	91,4
0,59	74,9
0,42	63
0,297	44,4
0,149	14
0,074	4,2

Gráfica 2.3: Granulometría del fango de depuradora



Cabe señalar que la granulometría del fango seco es muy similar a la de un árido fino. Además es un material muy esponjoso con muy baja densidad, del orden de  $1 \text{ g/cm}^3$ .

### 2.2.3. Caracterización química

En las siguientes tablas (*tablas 2.4, 2.5 y 2.6*), se expresan los resultados de la caracterización química del fango seco de Sabadell-Riu Sec.

Tabla 2.4: Caracterización del fango seco procedente de la depuradora de Sabadell.

<b>PH</b>	7,08
<b>Materia orgánica-500°C</b>	41,5-52%

Tabla 2.5: Elementos

Sabadell por Fluorescencia de Rayos X

mayoritarios del fango seco-

<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1,11±0,07%	<b>CaO</b>	22,7±0,2%
<b>MgO</b>	2,73±0,08%	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,24±0,02%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	12,9±0,2%	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10,1±0,1%
<b>SiO<sub>2</sub></b>	29,7±0,2%	<b>NiO</b>	0,13±0,010%
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	12,4±0,2%	<b>CuO</b>	0,23±0,02%
<b>SO<sub>3</sub></b>	3,22±0,08%	<b>ZnO</b>	0,84±0,04%
<b>Cl</b>	0,20±0,01%	<b>SrO</b>	0,29±0,02%
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,83±0,06%	<b>ZrO<sub>2</sub></b>	0,16±0,01%

Tabla 2.6: Resultado de la concentración de metales pesados en mg/l de la lixiviación DIN 38414-S4 [9], del fango seco-Sabadell.

<b>Bario</b>	0,75±0,02	<b>Manganeso</b>	0,23±0,01
<b>Zinc</b>	1,23±0,06	<b>Cadmio</b>	< 0,01
<b>Níquel</b>	<b>1,058±0,003</b>	<b>Cromo</b>	0,052±0,012
<b>Plomo</b>	< 0,05	<b>Arsénico</b>	< 0,1
<b>Cobre</b>	0,31±0,07		

Según el resultado de lixiviación DIN 38414-S4 [9], el fango seco de la depuradora de Sabadell es un residuo no inerte y entra en la categoría de residuo especial, debido a su concentración de níquel en el lixiviado. La clasificación está estipulada por el Decreto 34/1996 del 9 de enero de 1996 [11] de la Generalitat de Catalunya, en el que se clasifican los residuos según los valores de los parámetros del mismo residuo y sobre los valores de los parámetros del lixiviado, *tabla 2.7*

Tabla 2.7: Parámetros sobre el lixiviado según norma DIN 38414-S4, Decreto 34/1996 del 9 de enero de 1996 [11] de la Generalitat de Catalunya.

<b>Parámetros</b>	<b>A</b>	<b>B</b>
PH	5,5<X<12	4<X<13
Conductividad (mS/cm)	6	50
TOC (mg C/l)	40	100
Arsénico (mg/l)	0,1	0,5
Cadmio (mg/l)	0,1	0,2
Cobre (mg/l)	2	5
Cromo VI (mg/l)	0,1	0,1
Mercurio (mg/l)	0,02	0,05
Níquel (mg/l)	0,5	<b>1</b>
Plomo (mg/l)	0,5	1
Zinc (mg/l)	2	5
Índice de fenoles (mg/l)	1	10
Fluoruros (mg/l)	5	25
Cloruros (mg/l)	500	5000
Sulfatos (mg/l)	500	1500
Nitritos (mg/l)	3	10
Amonio (mg/l)	5	200
Cianuros (mg/l)	0,1	0,5
AOX (mg Cl/l)	0,3	1,5

- Se consideran residuos inertes los que no superan ningún valor de la columna A.
- Se consideran residuos no especiales los que no superan ninguno de los valores de la columna B.
- Se consideran residuos especiales los que superan alguno de los valores de la columna B.

Por la cantidad de níquel existente en el lodo se considerará el lodo como residuo especial y se tendrá que realizar un mayor seguimiento de los fangos de depuradora y su utilización.

También se han dado porcentajes sobre la composición del fango de depuradora, además de una caracterización microbiológica (tabla 2.8)

Tabla 2.8: Caracterización química y microbiológica del fango de depuradora.

COMPONENTES	PORCENTAJES
Proteínas	0,41%
Grasas	0,33%
Hidratos de carbono	65,47%
Relación C/N	1,93
Nitrógeno orgánico	0,09%
Fósforo	0,38%
Cenizas	31,79%
Aerobios	26 ufc/gr.
Enterobacteriaceas	< 10 ufc/gr.
E.Coli	< 3 nmp/gr.
Coliformes	< 3 ufc/gr.
Hongos	< 10 ufc/gr
Clostridium	< 10 ufc/gr.

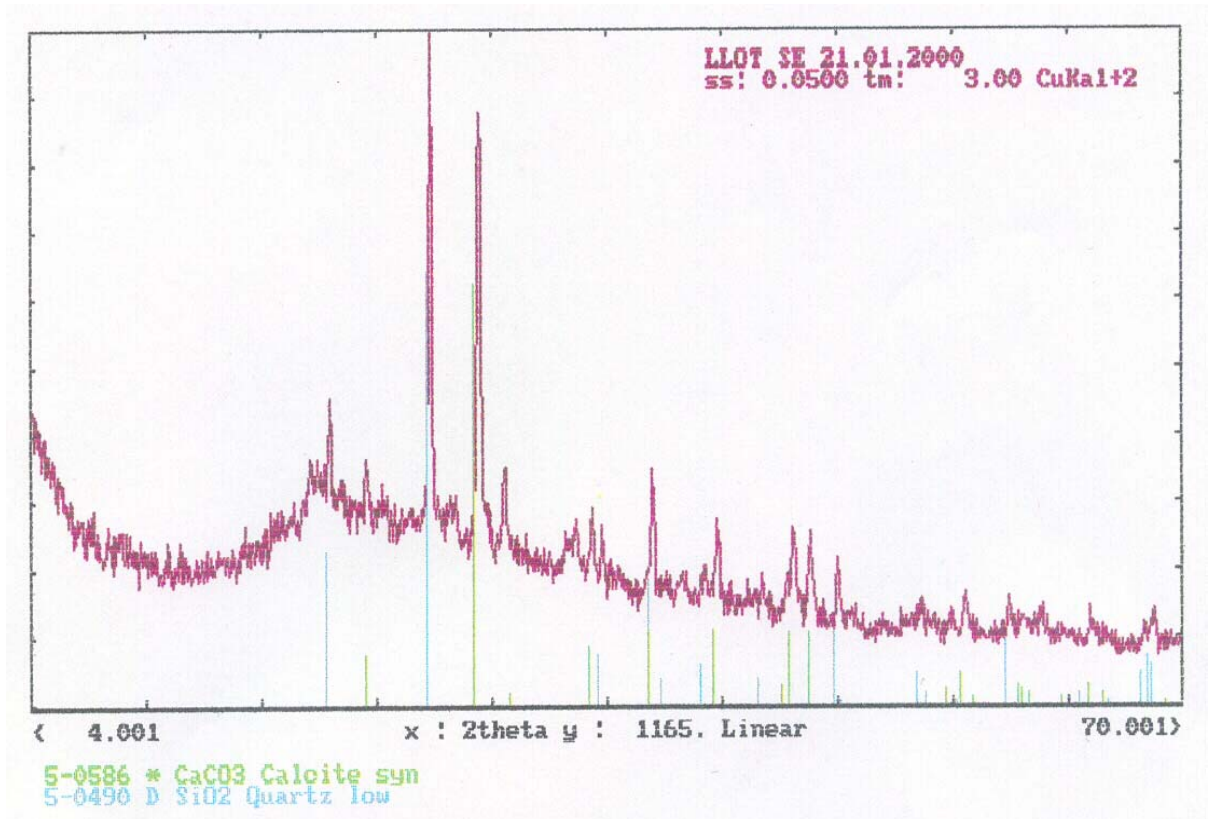
#### 2.2.4. Caracterización mineralógica

Para identificar la composición inorgánica cristalina del lodo se realiza el análisis de difracción de rayos X, obteniendo de este modo una caracterización mineralógica del fango sin tamizar.

En el *gráfico 2.9* se observa un fondo elevado correspondiente a la fracción amorfa del fango, que mayoritariamente es la parte orgánica del mismo, que es del orden del 50%.

Los minerales inorgánicos del fango más abundantes son el cuarzo y la calcita. Es importante mencionar que no hay arcillas en el fango seco.

Gráfico 2.9: Espectro de difracción de rayos X del fango seco-Sabadell, sin tamizar.



## 2.3. ÁRIDOS

### 2.3.1. Origen

El árido es uno de los componentes mayoritarios del hormigón. Éstos han de ser inertes y reaccionar lo mínimo con la pasta de cemento hidratado.

Los áridos utilizados en esta tesina son de origen calizo y de machaqueo. Se dividen en 4 fracciones: arena 0/2, arena 0/5, gravilla 5/12 y grava 12/18.

En cuanto a la caracterización del árido, se ha creído conveniente caracterizarlo sólo con algunos parámetros físicos, y no de manera detallada como se ha realizado con el fango (caracterización física, química y mineralógica). Esto es debido a que dichos áridos son materiales comunes y el estudio detallado de sus propiedades y composición no aportaría ningún aspecto relevante en este trabajo.



### 2.3.2. Caracterización física

#### 2.3.2.1. Densidad, absorción y equivalente de arena

a) Áridos gruesos. UNE 83-134 [12]

El procedimiento escogido tras tomar una muestra de masa razonable es el siguiente:

- Lavar la muestra sobre un tamiz de 4 mm y secar en estufa a 105°C hasta obtener una masa constante. Dejar enfriar y pesar (**M<sub>s</sub>**).
- Sumergir la muestra en agua durante 24 horas a 20°C. Secar la muestra superficialmente y pesar obteniendo **M<sub>a</sub>**.
- Colocar la muestra en un cesto de tela metálica con mallas de huecos inferiores a 3 mm y sumergirla en agua a 20°C. Agitar el cesto para eliminar las burbujas de aire y pesar obteniendo **M'<sub>a</sub>**.

b) Áridos finos. UNE 83-133 [13]

La masa de la muestra escogida ha de ser representativa. El proceso de ensayo es el siguiente:

- Secar en estufa a 110°C hasta masa constante. Dejar enfriar y pesar obteniendo **M<sub>s</sub>**.
- Se coloca la muestra en una bandeja y se sumerge a 20°C durante 24 horas. Luego se elimina el agua libre y se somete la probeta a una corriente de aire caliente para conseguir un secado uniforme. Con lo obtenido se llena un molde troncocónico, de diámetros de 40 mm y 90 mm y altura de 75 mm, y se enrasa. Se apisona 25 veces y se retira el molde. Este proceso se repite hasta que, al retirar el molde, la arena se desmorone pero conserve una pendiente de generatriz recta y adquiera una forma cónica. En ese momento la arena está en situación de saturación parcial con la superficie seca. Luego se pesa y se mide **M<sub>a</sub>**.
- La muestra anterior se introduce en un picnómetro de 1000cm<sup>3</sup> y se llena de agua hasta el 90% de su capacidad. Se agita el picnómetro para eliminar las burbujas de aire y se añade agua hasta arriba. Se pesa el conjunto picnómetro + probeta + agua (**M'<sub>1</sub>**).
- Se pesa el conjunto picnómetro + agua (**M'<sub>2</sub>**). Donde la masa buscada (**M'<sub>a</sub>**) será:

$$M'a = M'1 - M'2.$$

- Equivalente Arena. UNE-EN 933-8 [14]. Se preparan dos submuestras que se vierten en respectivas probetas donde hay una disolución lavadora. Se deja reposar 10 minutos. Justo después las agitamos 30 segundos y se colocan verticalmente. A continuación se lavan con la disolución favoreciendo la subida de finos. Tras llenar de líquido la probeta se comienza a medir el tiempo de sedimentación, que dura 20 minutos. Transcurrido ese periodo se aplica la relación dada más adelante.

Una vez encontrados los pesos se pasan a definir los parámetros buscados:

- Densidad real de la muestra seca:

$$d_{rs} = Ms / ( Ma - M'a )$$

- Densidad real de la muestra saturada con superficie seca:

$$d_{r_{sss}} = Ma / ( Ma - M'a )$$

- Absorción de agua:

$$Ab = ( Ma - Ms ) / Ms * 100$$

- Equivalente de arena (sólo en árido fino):

$$EA = ( altura\ del\ sedimento / altura\ del\ floculado ) * 100$$

Los resultados obtenidos se indican en las siguientes tablas (*tablas 2.10 y 2.11*). En ellas se aprecia que dan resultados lógicos, ya que las densidades son de orden creciente según si son reales secas o reales saturadas con superficie seca. También vemos que la capacidad de absorción de las arenas es superior a las de las gravas.

Tabla 2.10: Características físicas de los áridos gruesos

	Gravilla 5/12	Grava 12/18
<b><math>d_{rs}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,64	2,67
<b><math>d_{r_{sss}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,66	2,69
<b>Ab (%)</b>	0,75	0,60

Tabla 2.11: Características físicas de los áridos finos

	<b>Arena 0/2</b>	<b>Arena 0/5</b>
<b>d<sub>rs</sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,56	2,51
<b>d<sub>r<sub>sss</sub></sub> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,60	2,58
<b>Ab (%)</b>	1,82	2,8
<b>EA (%)</b>	72	79

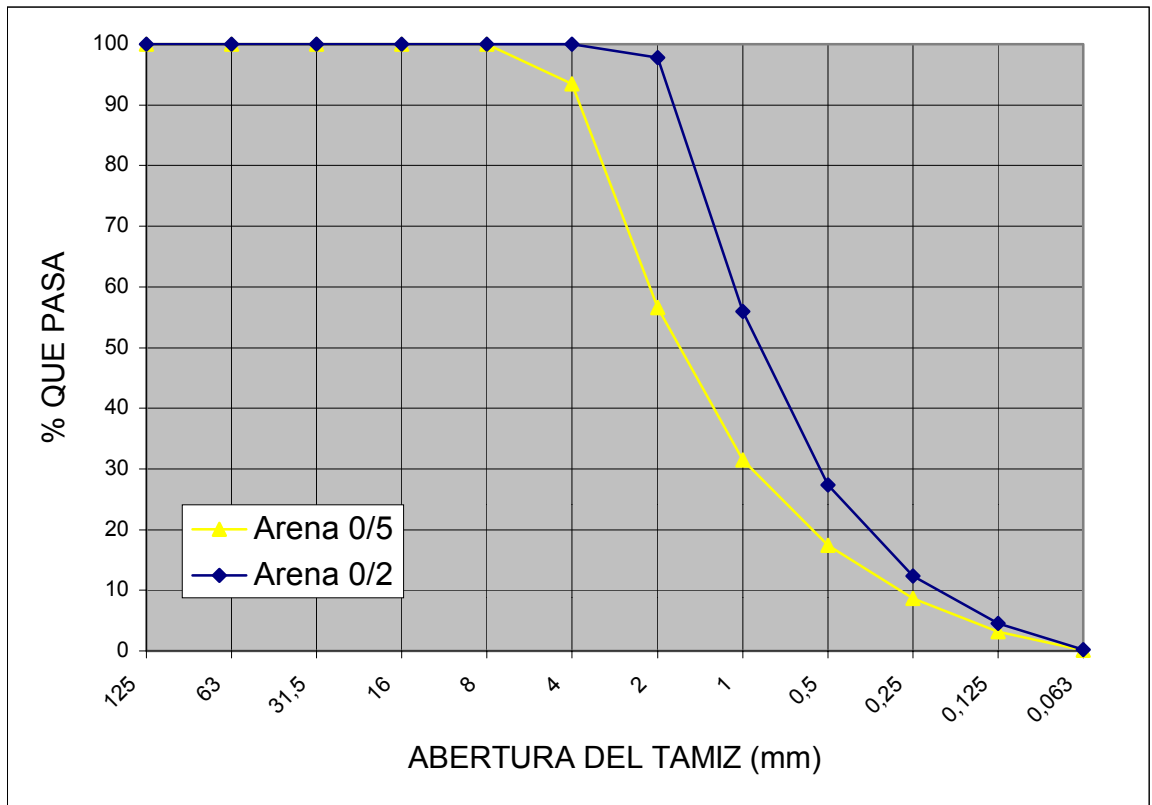
### 2.3.2.2. Granulometrías

Las granulometrías de los diversos áridos utilizados se resumen en las siguientes tablas (tabla 2.12) y gráficas (gráficas 2.13 y 2.14). Para la realización del ensayo se ha seguido la norma UNE-EN 933-1 [15]. En ella se nos indica el método de trabajo para ir obteniendo las distintas fracciones que pasan los distintos tamices que figuran en la normativa UNE-EN 933-2 [16]. Comprobamos que los resultados de las granulometrías para los diferentes áridos son correctas verificando las fracciones dadas.

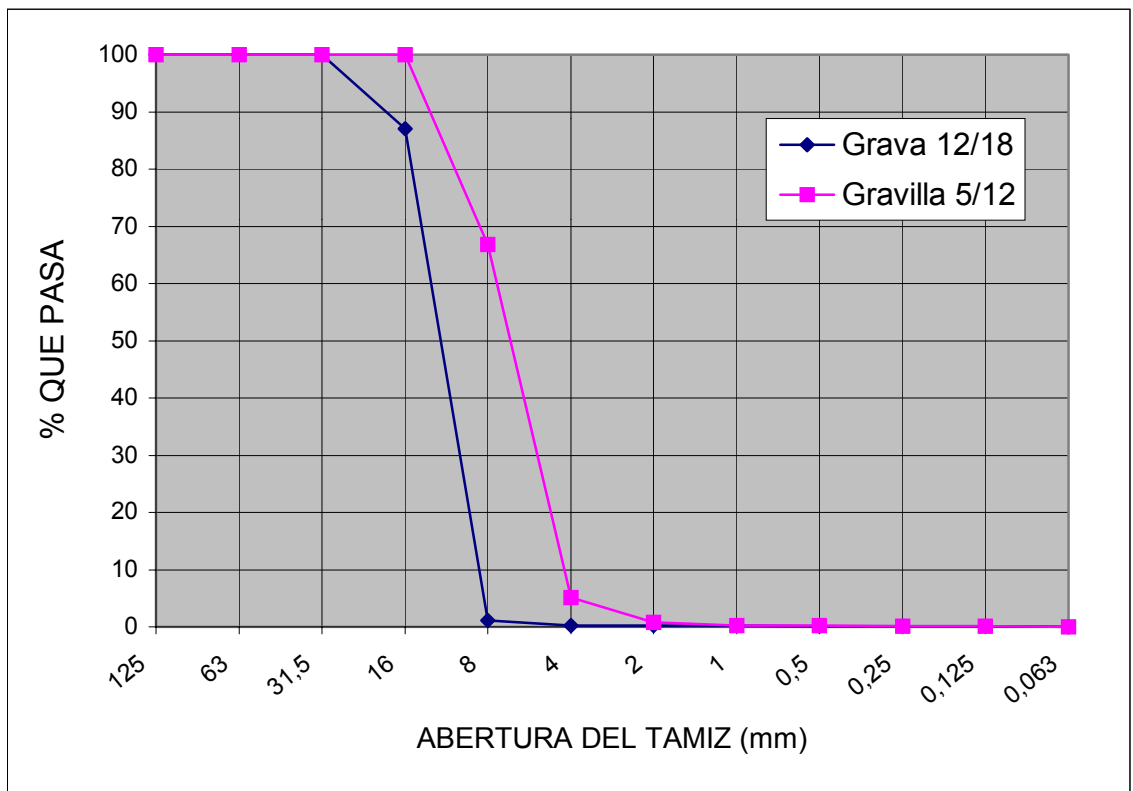
Tabla 2.12: Granulometría de los áridos.

<b>Tamiz (mm)</b>	<b>% Pasa</b>			
	<b>Grava 12/18</b>	<b>Gravilla 5/12</b>	<b>Arena 0/5</b>	<b>Arena 0/2</b>
<b>125</b>	100	100	100	100
<b>63</b>	100	100	100	100
<b>31,5</b>	100	100	100	100
<b>16</b>	87,06	100	100	100
<b>8</b>	1,07	66,84	100	100
<b>4</b>	0,26	5,16	93,5	100
<b>2</b>	0,19	0,83	56,55	97,8
<b>1</b>	0,17	0,25	31,5	56
<b>0,5</b>	0,14	0,17	17,45	27,4
<b>0,25</b>	0,1	0,14	8,63	12,35
<b>0,125</b>	0,06	0,10	3,13	4,5
<b>0,063</b>	0,02	0,04	0,07	0,215

Gráfica 2.13: Granulometría del árido fino.



Gráfica 2.14: Granulometría del árido grueso.



## 2.4. CEMENTO

El cemento que se ha empleado en la realización de esta tesina ha sido cedido por la empresa Ciments Molins y es del tipo: Dragon: CEM II/A-L 32,5R UNE 80.301:96/RC-97

Es un cemento Pórtland de categoría resistente media y con un porcentaje de filler calizo que mejora su trabajabilidad, disminuye el riesgo a la aparición de fisuras y es idóneo para su empleo en aplicaciones de albañilería, aunque también es muy usado en obras de hormigón en masa o armado y en la elaboración de morteros especiales. No es apropiado en ambientes agresivos ni en pretensados. Hay que vigilar su retracción y desecación en su puesta en obra.

Las características físicas, químicas y mecánicas más importantes de este cemento, se resumen en la siguiente tabla (*tabla 2.15*).

*Tabla 2.15: Características físicas, químicas y mecánicas del cemento Dragon*

<b>Características</b>	<b>Especificaciones</b>	<b>Valor habitual</b>
Clinker (%)	80 mínimo	83
Filler calizo (%)	6 mínimo	17
Componente minoritario adic. (%)	5 máximo	-----
Trióxido de azufre (%)	3,5 máximo	3
Cloruros (%)	0,1 máximo	0,01
Superficie espec. Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	-----	4000
Expansión Le Chatelier (mm)	10 máximo	1
Inicio fraguado (minutos)	60 mínimo	150
Final fraguado (horas)	12 máximo	4
Compresión en 1 día (N/mm <sup>2</sup> )	-----	8
Compresión en 2 días (N/mm <sup>2</sup> )	13,5 mínimo	18
Compresión en 7 días (N/mm <sup>2</sup> )	-----	30
Compresión en 28 días (N/mm <sup>2</sup> )	32,5 mínimo	40

## 2.5. ADITIVO

El aditivo empleado es un fluidificante o reductor de agua de alta actividad. En concreto el denominado MELCRET PF-75.

Una relación de agua/cemento alta va bien para la trabajabilidad del hormigón, este aditivo mantiene la trabajabilidad pero sin tanta cantidad de agua, pudiendo reducir el asiento del cono de Abrams y subir también la resistencia. Otra característica de este aditivo es que rebaja la tensión superficial, separando las partículas de cemento lo que produce una mayor hidratación. Este fenómeno provoca también inconvenientes como la formación de burbujas de aire en el interior que reducirá la resistencia y un efecto retardador.

## **2.6. AGUA**

El agua utilizada ha sido la que llega al laboratorio a través de la red de abastecimiento.