



Universidad  
de La Laguna

Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería Civil e Industrial

## **Trabajo Fin de Grado**

ESTUDIO PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS POR EL MÉTODO DEL  
EMPAQUETAMIENTO COMPRESIBLE.

**Para optar al título de:** Graduada en Ingeniería Civil

**Autor/es:** Ana Miranda Hardisson

**Tutor/es:** Eduardo González Díaz (Depto. de Técnicas y  
Proyectos en Ingeniería y Arquitectura.)

Julio de 2014

## **Agradecimientos:**

Quiero dejar constancia de mi gratitud hacia todos aquellos que han colaborado en la realización de este Trabajo Fin de Grado, y que de alguna manera me han ayudado y animado a llevarlo a cabo.

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi tutor Eduardo González Díaz, profesor de la Escuela Superior Politécnica de Ingeniería de la Universidad de La Laguna, por su confianza y gran apoyo, pero sobre todo por su seguimiento del estudio y por su disponibilidad cada vez que le he necesitado, muchas gracias por tu tiempo.

A mi profesor Manuel García Román por ayudarme en el cálculo de las matrices de efecto pared y alejamiento del MEC en el programa Excel.

No puedo olvidarme de Francisco Valladares Alonso, técnico del laboratorio de Química y Materiales de la Escuela Superior Politécnica de Ingeniería en la sección de Arquitectura Técnica de la Universidad de La Laguna, porque sin él no podría haber llevado a cabo el trabajo de laboratorio, muchísimas gracias por tu amabilidad.

Por último y no menos importante quiero agradecer a mi familia el apoyo que me ha dado siempre, en especial mis padres, por todo, a ellos les agradezco encarecidamente el esfuerzo, de nuevo el apoyo y los ánimos. Muchas gracias por estar ahí siempre. Al resto de mi familia, amigos por alentarme y a mis compañeras de clase por la inmejorable compañía en el trayecto.

Para finalizar, dedico este estudio a mi abuelo Eduardo, por sembrar la ilusión.

## Resumen:

En este trabajo se ha realizado un estudio para el diseño de mezclas por el método de empaquetamiento compresible (MEC) de De Larrard. Para ello se han confeccionado mezclas mediante tres métodos de ajuste granulométrico, el MEC, Bolomey y el ajuste comercial.

Además para cada granulometría se ha variado la relación agua/cemento, con el objetivo de estudiar los cambios que produce esta variable en los resultados de los ensayos.

Se han realizado amasadas de prueba para comprobar la bondad del método determinando las propiedades y características de estos hormigones, tanto en estado fresco como endurecido. Para ello se realizó una primera serie de amasadas con el cemento CEM IV/B (P) 32,5N, por ser el que inicialmente estaba disponible en el laboratorio. Posteriormente se repitió la amasada que obtuvo un mejor comportamiento mecánico con el cemento de clase resistente 32,5N, sustituyendo este por un CEM I 52,5R, con lo que se consiguió un hormigón de altas prestaciones.

Se ofrece además una guía de uso del programa de BètonLabFree3 basada en la facilitada por De Larrard. Con este programa se pueden simular amasadas con distintas dosificaciones y obtener sus propiedades características virtualmente.

## **Abstract:**

This paper has conducted a study for the design of mixtures by the Compressible Packing Model (CPM) of De Larrard. Three methods of particle size adjustment, the CPM, the adjust of Bolomey, and trade adjustment have been used to make concrete mixes.

Besides the sieve adjustment, the water / cement ratio has been varied in each type of setting to check the changes that occur in the test results.

There have been made test mixes to ascertain the validity of the method by determining the characteristic properties of these concretes, both fresh and hardened state. To get this, a first series of mixes were made with CEM IV / B (P) 32,5N cement, for being the one available in the laboratory at that time. Then, the mix which got higher mechanical features with the CEM IV / B (P) 32,5N was repeated using CEM I 52,5R, so a high strength concrete was achieved.

There is also provided a guide to using the program BètonLabFree3, based on the one offered by De Larrard. With this program, mixes can be simulated with different dosages and the program gives their properties virtually.

## ÍNDICE

1. Introducción.....	9
2. Componentes del hormigón.....	11
2.1. Cemento.....	11
2.1.1 Componentes del clinker:.....	11
2.1.2. Hidratación del cemento.....	12
2.2. Adiciones.....	14
2.2.1. Humo de sílice.....	14
2.2.2. Cenizas volantes.....	15
2.3. Agua.....	16
2.3.1. Agua de amasado.....	16
2.3.2. Agua de curado.....	17
2.4. Áridos.....	18
2.4.1. Métodos de dosificación y granulometrías óptimas.....	19
2.5. Aditivos.....	20
2.5.1. Clasificación de los aditivos.....	20
2.5.2. Aditivos superplastificantes: copolímeros vinílicos y policarboxilatos.....	21
3. Modelo de Empaquetamiento Compresible.....	24
3.1. Descripción general del método.....	24
3.1.1 Notaciones y definiciones.....	24
3.2. Empaquetamiento virtual, empaquetamiento real.....	25
3.2.1. Módulo I: Empaquetamiento virtual.....	25
3.2.2. Módulo II: Empaquetamiento real.....	27
3.2.3. Ejemplo de aplicación matemática.....	28
3.3. Aplicación del modelo al comportamiento del hormigón en estado fresco: viscosidad plástica y tensión de cizalla.....	33
3.3.1. Viscosidad plástica.....	34
3.3.2. Tensión de cizalladura.....	35
3.4. Aplicación del modelo al comportamiento del hormigón en estado endurecido: resistencia a compresión y módulo de elasticidad.....	37
3.4.1. Resistencia a compresión.....	37
3.4.2. Módulo de elasticidad.....	38
3.5. Software BétonlabFree 3.....	39

<b>4. Fase experimental.....</b>	<b>47</b>
4.1. Caracterización de los materiales.....	47
4.1.1 Cemento: .....	47
4.1.2. Áridos:.....	48
4.1.3. Humo de sílice:.....	48
4.1.4 Tipo y características del aditivo:.....	49
4.2. Elaboración de los hormigones. ....	49
4.2.1 Dosificaciones: .....	49
4.2.2 Amasado, consolidación y curado de las probetas: .....	54
4.3. Ensayos de consistencia: .....	55
4.4. Ensayo de densidad. ....	59
4.5. Ensayo de resistividad eléctrica. ....	60
4.5.1. Método directo. ....	61
4.5.2. Método indirecto. ....	66
4.6. Ensayo de velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos. ....	70
4.7. Ensayo de resistencia a compresión. ....	73
4.8. Ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión.....	79
4.9. Ensayo de resistencia a tracción indirecta de probetas.....	82
<b>5. Resultados. ....</b>	<b>87</b>
5.1. Variación de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) y la resistividad ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) en el tiempo. ....	89
5.2. Comparación de la resistividad a los 28 días y la resistencia a compresión de las probetas según el ajuste granulométrico. ....	96
5.3. Comparación de la resistencia a compresión según ajuste granulométrico. ....	99
5.4. Comparación de la resistencia a tracción indirecta según ajuste granulométrico. ....	100
5.5. Comparación de las resistencias a tracción y a compresión (MPa).....	101
5.6. Velocidad de impulsos ultrasónicos en m/s. ....	103
5.7. Penetración de agua a presión medida en el ensayo Brasileño. ....	104
5.8. Comparación de la resistencia a compresión obtenida mediante ensayo de rotura y cálculo a través del módulo de elasticidad dinámico.....	106
<b>6. Discusión y conclusiones. ....</b>	<b>109</b>
6.1. Variación de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) y la resistividad ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) en el tiempo. ....	109
6.2. Comparación de la resistividad a los 28 días y la resistencia a compresión de las probetas según el ajuste granulométrico.....	109
6.3. Comparación de la resistencia a compresión según ajuste granulométrico.....	110
6.4. Comparación de la resistencia a tracción indirecta según ajuste granulométrico. ....	110
6.5. Comparación de las resistencias a tracción y a compresión (MPa).....	111

6.6.	Velocidad de impulsos ultrasónicos en m/s. ....	112
6.7.	Penetración de agua a presión medida en el ensayo Brasileño. ....	112
6.8.	Comparación de la resistencia a compresión obtenida mediante ensayo de rotura y cálculo a través del módulo de elasticidad dinámico.....	112
<b>6.</b>	<b>Discussion and conclusions.....</b>	<b>114</b>
6.1.	Variation of the density (kg/m <sup>3</sup> ) and resistivity ( $\Omega \cdot m$ ) over time. ....	114
6.2.	Comparison of the resistivity at 28 days and the compressive strength of the specimens according to sieve setting. ....	114
6.3.	Comparison of the compression strength according to the sieve setting.....	114
6.4.	Comparison of tensile splitting strength according sieve adjustment. ....	115
6.5.	Comparison of tensile and compressive strengths (MPa). ....	115
6.6.	Ultrasonic pulse velocity in m / s. ....	116
6.7.	Deep of penetration of water under pressure measured in the Brazilian test. ....	116
6.8.	Comparison between the compressive strength obtained by the experimental essay and the calculated via the dynamic elasticity modulus. ....	117
<b>7.</b>	<b>Anexos. ....</b>	<b>119</b>
7.1.	Anexo fotográfico: .....	119
<b>8.</b>	<b>Bibliografía. ....</b>	<b>130</b>

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1. Introducción.

Desde las primeras obras de piedra unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas, realizadas hace 5000 años al norte de Chile<sup>[7]</sup>, hasta el hormigón que utilizamos hoy en día, ha habido muchos avances, tanto en las formas como en el contenido, es por eso tan importante continuar buscando mejoras y nuevos métodos que hagan que este material funcione aún mejor, conseguir la máxima eficacia con mayor eficiencia.

El hormigón actual, sin el cual no se concibe obra alguna, está formado a primera vista por la matriz y los áridos. La matriz está formada por la pasta de cemento mientras que los áridos son materiales inertes y rígidos que forman el esqueleto granular principal.

Con tamaños de áridos por debajo de un límite y consiguiendo un empaquetamiento óptimo de las piezas, se puede conseguir un mejor comportamiento y mejor caracterización mecánica del hormigón obtenido.

A este respecto, el francés De Larrard desarrolló en 1999 un modelo de empaquetamiento que trata precisamente de obtener la colocación más cercana a la óptima de los áridos para aumentar las resistencias, es el Modelo de Empaquetamiento Compresible, el cual se detalla más adelante.

Fue este modelo el que inspiró este estudio, el cual tiene como objetivo comprobar si siguiendo el método dictado por De Larrard se consiguen mejores prestaciones que mediante otros métodos, a partir de la distribución granulométrica que define cada método.

Para elaborar este estudio se realizarán distintas dosificaciones con dos relaciones agua cemento cada una de ellas, y se elaborarán dos probetas por cada amasada, y se medirán sus características para determinar cuál de ellas da lugar a mejores resultados.

## **CAPÍTULO 2. COMPONENTES DEL HORMIGÓN**

## **2. Componentes del hormigón.**

El hormigón es un material de construcción constituido básicamente por rocas, de tamaño máximo limitado, que cumplen ciertas condiciones en cuanto a sus características mecánicas, químicas y granulométricas, unidas por una pasta aglomerante formada por un conglomerante, el cemento, y agua.

A este material básico y en el momento del amasado, pueden añadirse otros productos o materiales para mejorar algunas características determinadas.

### **2.1. Cemento.**

En la constitución del hormigón la unión de los áridos se logra por medio de cementos que generalmente son “cementos portland”; estos pertenecen a la familia de los conglomerantes hidráulicos formados por materiales pulverulentos artificiales de materia inorgánica que reaccionan con el agua dando lugar a un producto sólido resistente y estable, tanto en el aire como en el agua.

De todos los conglomerantes hidráulicos, el cemento portland y sus derivados son los más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso que son minerales muy abundantes en la naturaleza.

Dentro de los conglomerantes hidráulicos entran también los cementos de horno alto, los puzolánicos y los compuestos, teniendo todos estos un campo muy grande de empleo en hormigones para determinados medios.

El cemento está compuesto por clinker, cuyos componentes se describen en el apartado 2.1.1, y por un regulador de fraguado que habitualmente es yeso dihidratado ( $\text{CaSO}_4$ ), sin él, el clinker fraguaría de forma casi instantánea.

#### **2.1.1 Componentes del clinker:**

El clinker está formado por una mezcla de silicatos, aluminatos y ferrito aluminato de cal. Concretamente:

· **Alita**, silicato tricálcico ( $C_3S$ ): Este componente se puede considerar el principal del clinker, confiriendo altas resistencias iniciales al cemento; prácticamente en una semana desarrolla sus resistencias y después presenta una elevación muy lenta de las mismas.

· **Belita:**

- Silicato bicálcico ( $C_2S$ ): Componente metaestable que da pocas resistencias en los primeros días pero luego las va desarrollando progresivamente hasta alcanzar al silicato tricálcico.

- Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ): Este componente por sí solo contribuye poco a las resistencias del cemento pero en presencia de los silicatos desarrolla unas resistencias iniciales buenas. Se cree que actúa como catalizador de la reacción de los silicatos. Puesto que su hidratación es rapidísima al tomar contacto con el agua, hay que emplear yeso como regulador de fraguado. Se debe tener presente también que los clínkeres que poseen un contenido alto en aluminato tricálcico dan lugar a pastas, morteros y hormigones muy sensibles al ataque por sulfatos y otros agresivos.

· **Celita:** Ferrito aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ): Es un componente que poco aporta a la resistencia de los cementos. Su hidratación es rápida aunque menor que la del aluminato y produce un buen desprendimiento de calor. El hierro que forma la celita tiene una gran importancia como fundente en el horno y es el responsable del color gris verdoso de los cementos portland.

Los componentes secundarios son la cal libre ( $CaO$ ), óxido de magnesio ( $MgO$ ), alcalinos ( $K_2O$ ), ( $Na_2O$ ), y trióxido de azufre ( $SO_3$ ).

### 2.1.2. Hidratación del cemento.

Cuando se mezcla el cemento portland con agua, los silicatos y aluminato se hidratan dando lugar a una masa rígida y dura conocida con el nombre de cemento endurecido. La hidratación se produce mediante una reacción con el agua y una hidrólisis.

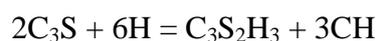
Se puede considerar la hidratación del cemento como un proceso en el cual se produce una disolución con reacción de los componentes con el agua, seguida de una difusión y precipitación de los componentes hidratados.

En el proceso de hidratación es necesario que exista suficiente agua, cemento anhidro disponible, y que la difusión pueda tener lugar hacia los espacios de tamaño adecuado donde precipiten nuevos productos sólidos hidratados. Esto, según Fernández Cánovas<sup>[7]</sup>, sucede cuando la relación agua/cemento en la pasta es del orden de 0,35-0,40 en peso.

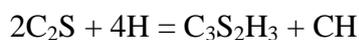
La cinética del proceso de hidratación está influenciada por varios factores como son: la composición del cemento y su finura de molido, la temperatura de la pasta, la relación agua/cemento de la misma, la presencia de adiciones, etc. Cualquiera de estos factores aumentan la velocidad de hidratación, pero a su vez se produce un retraso en el grado de hidratación, por lo que es necesario conocer la cinética de la hidratación para controlar su proceso.

La hidratación separada de cada componente ocurre de la siguiente forma:

- **Silicato tricálcico**: reacciona rápidamente con el agua produciendo “tobermorita”  $C_3S_2H_3$  y “portlandita”  $Ca(OH)_2$ , en forma simplificada CH, según la siguiente reacción:



- **Silicato bicalcico**: reacciona más lentamente según:



- **Aluminato tricálcico**: el aluminato hidratado forma un material intersticial rodeando a los silicatos hidratados. El  $C_3A$  con el agua es de reacción rápida debido al gran poder de disolución del mismo produciendo un endurecimiento rápido de la pasta conocido como “fraguado relámpago”.

Para evitar este fraguado relámpago y hacer la mezcla trabajable se añade al clinker yeso dihidratado ( $\text{CaSO}_4$ ) que disminuye la solubilidad del aluminato al existir ahora cal y yeso en disolución.

El yeso y el aluminato reaccionan para formar sulfoaluminato de calcio hidratado insoluble o sal de Candlot.

## **2.2. Adiciones.**

Se conoce con el nombre de adiciones a aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos, o con hidraulicidad latente que pueden añadirse al cemento, mortero u hormigón, con la finalidad de mejorar algunas de las características físicas y/o químicas de los mismos o conferirles algunas especiales.

Las adiciones pueden utilizarse como componentes del hormigón siempre que se justifique su idoneidad para su uso, produciendo el efecto deseado sin modificar negativamente las características del hormigón, ni representar peligro para la durabilidad del hormigón, ni para la corrosión de las armaduras.

En el caso de la adición al cemento, éstas se incorporan generalmente en el molino de cemento junto al clínker y el regulador de fraguado. Si la adición se hace a los morteros o a los hormigones las adiciones se añaden a la mezcla como complemento de la cantidad de cemento o como sustitución de una parte de ella, pero sin que esta sustitución de lugar a que la cantidad de cemento sea inferior a los mínimos especificados en los códigos o instrucciones de hormigones.

### **2.2.1. Humo de sílice.**

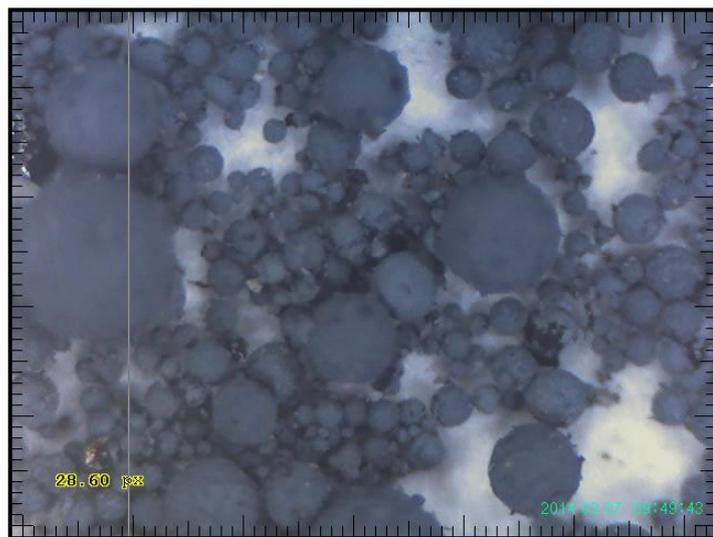
El humo de sílice (D), denominado también microsílíce, es un subproducto pulverulento esférico procedente de la fabricación en hornos eléctricos del silicio y del ferrosilicio a partir de cuarzo, caliza y hierro. El polvo se recoge en filtros electrostáticos y está formado por partículas esféricas de una gran finura compuestas de  $\text{SiO}_2$ .

El papel del humo de sílice en los hormigones es doble: uno físico, al actuar como plastificante como consecuencia de su finura, y otro químico al reaccionar con el hidróxido cálcico procedente de los compuestos activos del cemento dando lugar a silicatos cálcicos

hidratados de composición parecida a los procedentes de la hidratación del cemento y produciendo un aumento de resistencias mecánicas. No sólo son estos los efectos conseguidos sino también un aumento de la adherencia de la pasta a los áridos, una disminución importante de la permeabilidad de los hormigones al cerrar muchos de los conductos capilares que éste posee, y un aumento de la cohesión de la mezcla.

La EHE-08<sup>[5]</sup> en su artículo 30 “Adiciones”, limita el uso de humo de al 10% del peso del cemento. Dado que es una adición costosa lo mejor es emplearla en la cantidad suficiente para que reaccione con la portlandita o cal liberada en la hidratación del cemento. Un exceso de humo de sílice sobre el necesario para formar silicatos sólo sirve como “filler” que actúa de forma física y que demanda gran cantidad de agua.

El humo de sílice es imprescindible en la obtención de hormigones de altas prestaciones.



*Fig.2.1. Humo de sílice, fotografía tomada a microscopio.*

### **2.2.2. Cenizas volantes.**

Las cenizas volantes son un residuo sólido y en estado de fina división procedente de la combustión de carbón pulverizado en los hogares de centrales termoeléctricas y que es arrastrado por los gases y recuperado por precipitación electrostática o por captación mecánica.

Las cenizas volantes como adición al cemento, debido a su composición, son capaces de combinarse con la cal procedente de la hidratación de los componentes activos del cemento portland para dar compuestos, especialmente silicatos hidratados, parecidos a los procedentes de la hidratación del cemento, es decir tobermorita, que van a contribuir a incrementar las resistencias mecánicas del cemento, a la vez, al reaccionar con la cal la van a fijar impidiendo problemas de lixiviación por aguas puras o de ataque por aguas ácidas, mejorando, por tanto, la durabilidad de los morteros hormigones. En este aspecto su comportamiento es parecido al de las puzolanas naturales.

Las cenizas volantes pueden ser de naturaleza silíceas (V) o calcáreas (W). Las primeras tienen propiedades puzolánicas, y las segundas pueden tener además propiedades hidráulicas.

### **2.3. Agua.**

El agua es el segundo componente del hormigón empleándose en el amasado del mismo y en su curado. Dependiendo que se emplee con uno u otro fin se le exigirán unas u otras características.

#### **2.3.1. Agua de amasado.**

El agua que se añade en la hormigonera, junto con los demás componentes del hormigón, tiene las misiones de hidratar los componentes activos del cemento; actuar como lubricante haciendo posible que la masa fresca sea trabajable, y crear espacio en la pasta para los productos resultantes de la hidratación del cemento.

La EHE-08<sup>[5]</sup> en su artículo 27 “Agua” indica que el agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente perjudicial en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión.

En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica. Cuando no se posean antecedentes de su utilización, o en caso de duda, deberán analizarse las aguas, y salvo justificación especial de que no alteran perjudicialmente las propiedades exigibles al hormigón, deberán cumplir las siguientes condiciones:

- exponente de hidrogeno pH (UNE 7234)  $\geq 5$
  
- sustancias disueltas (UNE 7130)  $\leq 15$  gramos por litro (15.000 ppm.)
  
- sulfatos, expresados en SO<sub>4</sub> (UNE 7131),  
excepto para el cemento SR en que se eleva  
este límite a 5 gramos por litro (5.000 ppm.)  $\leq 1$  gramo por litro (1.000 ppm.)
  
- ion cloruro, Cl<sup>-</sup> (UNE 7178):
  - a) para hormigón pretensado  $\leq 1$  gramo por litro (1.000 ppm.)
  - b) para hormigón armado u hormigón  
en masa que contenga armaduras para  
reducir la figuración  $\leq 3$  gramos por litro (3.000 ppm.)
  
- hidratos de carbono (UNE 7132) 0
  
- sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7235)  $\leq 15$  gramos por litro (15.000 ppm.)

Realizándose la toma de muestras según la UNE 7236 y los análisis por los métodos de las normas indicadas.

Podrán emplearse aguas de mar o aguas salinas análogas para el amasado o curado de hormigones que no tengan armadura alguna. Salvo estudios especiales, se prohíbe expresamente el empleo de estas aguas para el amasado o curado de hormigón armado o pretensado.

### **2.3.2. Agua de curado.**

Las aguas adecuadas para el amasado lo son también para el curado. El peligro de las sustancias nocivas para el amasado no lo es tanto para el curado debido principalmente a que el agua de curado está en contacto con el hormigón un tiempo relativamente corto. No obstante, en curados prolongados y especialmente cuando se realizan por inmersión en agua, los mismos porcentajes de sustancias nocivas pueden ser más perjudiciales que las contenidas en el agua de amasado.

En el caso de que los cementos empleados tengan alto contenido en puzolanas, es recomendable que el pH del agua no sea superior a 6,5 especialmente si el curado se hace por inmersión en agua y es prolongado.

## 2.4. Áridos.

Los áridos que entran en la composición del hormigón son materiales granulares inertes, de tamaño comprendido entre 0 y 100 mm, de naturaleza inorgánica, alguna vez orgánica, y de procedencia natural o artificial que contribuyen a la estabilidad de volumen, resistencias y economía de los morteros y hormigones.

La EHE-08<sup>[5]</sup> en su artículo 28 “Áridos” indica que las características de los áridos deberán permitir alcanzar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón que con ellos se fabrica.

Como áridos para la fabricación de hormigones pueden emplearse áridos gruesos (gravas) y áridos finos (arenas), según UNE-EN 12620<sup>[30]</sup>, rodados o procedentes de rocas machacadas, así como escorias siderúrgicas enfriadas por aire según UNE-EN 12620<sup>[30]</sup> y, en general, cualquier otro tipo de árido cuya evidencia de buen comportamiento haya sido sancionado por la práctica y se justifique debidamente.

En el caso de áridos reciclados, se seguirá lo establecido en el Anejo nº15 de la EHE-08<sup>[5]</sup>. En el caso de áridos ligeros, se deberá cumplir lo indicado en el Anejo no 16 de esta Instrucción, y en particular, lo establecido en UNE-EN 13055-1<sup>[31]</sup>.

En el caso de utilizar áridos siderúrgicos (como, por ejemplo, escorias siderúrgicas granuladas de alto horno), se comprobará previamente que son estables, es decir, que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos inestables.

Dada su peligrosidad, sólo se permite el empleo de áridos con una proporción muy baja de sulfuros oxidables.

### 2.4.1. Métodos de dosificación y granulometrías óptimas.

La finalidad de los métodos de dosificación de hormigones es encontrar las proporciones en las que hay que mezclar los diferentes componentes para conseguir hormigones que posean determinadas características de resistencia, durabilidad, compacidad, etc.

Los métodos de dosificación pueden dividirse en dos grupos fundamentales: los basados en el contenido del cemento (por ejemplo, los métodos de Fuller y Bolomey) y los basados en la resistencia a compresión (como es el método de De la Peña). Ninguno de esos métodos puede tener en cuenta la gran cantidad de factores que influyen en las propiedades del hormigón a conseguir, por lo que siempre se hace necesario una comprobación experimental con las oportunas correcciones sobre las amasadas de prueba (González, E y Alloza A.M.<sup>[13]</sup>).

El ajuste granulométrico tiene como objetivo, a partir de la mezcla de los áridos conocidos, obtener una granulometría de árido resultante que se parezca lo más posible a la curva granulométrica ideal de compacidad máxima.

Se denomina granulometría óptima a la que, para una misma consistencia y relación agua/cemento, le corresponde un consumo mínimo de cemento, dando además el mínimo de segregación. En este sentido, Fuller, propone adaptar, en lo posible, la granulometría de la mezcla de áridos a una curva teórica que se toma como referencia por ser óptima. Dicha curva obedece a la ecuación:

$$y = 100 \sqrt{d/D} \quad (2.1)$$

en la que “y” es el 1% que pasa acumulado por el tamiz considerado, “D”, el tamaño máximo del árido en milímetros y “d” la abertura de cada uno de los tamices de la serie empleada en milímetros.

Otra curva granulométrica de referencia clásica y además, utilizada en este estudio, es la de Bolomey, en ella se tiene en cuenta el tipo de árido empleado, la consistencia del hormigón e introduce la proporción de cemento empleada. La ecuación de la curva de Bolomey es:

$$y = a + (100 - a)\sqrt{d/D} \quad (2.2)$$

donde “y”, “D” y “d” tienen el mismo significado que en la ecuación de Fuller; y “a” es un parámetro tabulado que depende del tipo de árido (rodado o de machaqueo) y de la consistencia del hormigón.

## 2.5. Aditivos.

A los efectos de EHE-08<sup>[5]</sup>, según su artículo 29 “Aditivos”, se entiende por aditivos aquellas sustancias o productos que, incorporados al hormigón antes del amasado (o durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario) en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento.

### 2.5.1. Clasificación de los aditivos.

La EHE-08<sup>[5]</sup> en su artículo 29 citado anteriormente y de acuerdo con su función principal, siguiendo lo establecido en la UNE-EN 934-2<sup>[20]</sup>, clasifica a los aditivos para hormigón en los siguientes:

Tipo de aditivo	Función principal
Reductores de agua / Plastificantes	Disminuir el contenido de agua de un hormigón para una misma trabajabilidad o aumentar la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
Reductores de agua de alta actividad / Superplastificantes	Disminuir significativamente el contenido de agua de un hormigón sin modificar la trabajabilidad o aumentar significativamente la trabajabilidad sin modificar el contenido de agua.
Modificadores de fraguado / Aceleradores, retardadores	Modificar el tiempo de fraguado de un hormigón.
Inclusores de aire	Producir en el hormigón un volumen controlado de finas burbujas de aire, uniformemente repartidas, para mejorar su comportamiento frente a las heladas.
Multifuncionales	Modificar más de una de las funciones principales definidas con anterioridad.

**Fig. 2.2.** Tipos de aditivos y función principal. [Art. 29.2 EHE-08<sup>[5]</sup>]

### 2.5.2. Aditivos superplastificantes: copolímeros vinílicos y policarboxilatos.

Los superplastificantes son productos que se han desarrollado desde hace décadas, pero que continúan en evolución permitiendo conseguir reducciones de agua de amasado de hasta el 30 por 100 sin tener los inconvenientes de los plastificantes como son el aire ocluido, exudación, segregación, alteraciones importantes en el fraguado, etc.

Los superplastificantes modifican la reología de los hormigones permitiendo conseguir tanto mezclas muy dóciles y fáciles de poner en obra, sin reducir sus resistencias, así como hormigones de docilidad normal pero con muy bajo contenido en agua e incluso hormigones con las dos características anteriores, es decir, buena docilidad y menor cantidad de agua de la normal, además de hormigones con reducida dosificación de cemento pero con resistencias y docilidad normales.

Los superplastificantes se clasifican en cuatro grupos fundamentales:

- Consensados de formaldehído melanina sulfonados (SMF).
- Consensados de formaldehído naftaleno sulfonados (SNF).
- Lignosulfonados modificados (MSL).
- Derivados de éteres policarboxílicos.

El principal efecto de los superplastificantes es provocar una dispersión entre las partículas de cemento, con lo cual, aparte del efecto reológico, se produce una alta velocidad inicial de hidratación del cemento al existir más contacto entre sus partículas y el agua. No obstante, la hidratación a edades más tardías se retrasa con respecto a los hormigones sin adición debido a la formación de una capa más impermeable y de mayor espesor de productos de retracción que la capa producida en los hormigones sin aditar.

**Copolímeros vinílicos** : Son aditivos superplastificantes de tercera generación, estos polímeros sintéticos poseen moléculas de mayor tamaño que los de generaciones anteriores, proporcionando un efecto plastificante mayor, la dispersión de las partículas de cemento es mucho más efectiva y así proporciona una mayor reducción de agua (alrededor del 30%) dando al hormigón mayores resistencias mecánicas (Benites C.M.<sup>[1]</sup>).

**Policarboxilatos:** Pertenecen a la última generación de superplastificantes. Químicamente se basan en copolímeros de ácido acrílico y grupos éter de ácido acrílico, poseen cadenas laterales a diferencia de los plastificantes tradicionales (macromolécula tipo peine). Se alcanza una reducción de agua de hasta el 40% combinado con una manejabilidad controlada y desarrollo de resistencias mecánicas tempranas (Benites C.M.<sup>[1]</sup>).

## CAPÍTULO 3. MEC

### 3. Modelo de Empaquetamiento Compresible.

#### 3.1.Descripción general del método.

El Modelo de Empaquetamiento Compresible de partículas (MEC), se utiliza para dosificar el hormigón relacionando el empaquetamiento de la mezcla granular con algunas propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido. Este modelo fue desarrollado por De Larrard (1999) para dosificar los más variados tipos de hormigones, tales como los hormigones de resistencia normal, de altas prestaciones, de muy altas prestaciones entre otros.

##### 3.1.1 Notaciones y definiciones.

**Compacidad:** Volumen de sólidos en un volumen unitario.

**Compacidad virtual:** Compacidad máxima de una mezcla granular dada para un índice de compactación máximo, este valor ideal solo se podría alcanzar si se impone una compactación infinita a la mezcla granular, por ejemplo en un ensamble ideal tetraédrico de esferas del mismo tamaño, la compacidad virtual tendrá un valor de 0,74.

**Compacidad real o experimental:** Es deducida de la compacidad virtual que la referencia a un índice de compactación dado según el método de compactación utilizado. Por ejemplo la compacidad física máxima de un acomodo de esferas varía entre 0,60 y 0,64.

**Clase granular:** Una clase granular  $i$  es por definición, un conjunto de granos unidimensionales de diámetro  $d_i$ . En el presente se tomará la convención  $d_1 > d_2 > \dots > d_i > d_{i+1} > \dots > d_n$ .

La tabla siguiente resume todas las notaciones utilizadas en este método:

Símbolo	Descripción
$n$	Número de clases granulares de una mezcla.
$d_i$	Diámetro promedio de la clase $i$ .
$\beta_i$	Compacidad virtual clase $i$ .
$y_i$	Porción volumétrica de la clase $i$ en la mezcla.
$\phi_i^*$	Volumen parcial máximo ocupado por la clase $i$ en presencia de otras clases.
$\phi_i$	Volumen parcial en la mezcla de la clase $i$ .
$\gamma_i$	Compacidad virtual de la mezcla se la clase $i$ es dominante.
$\gamma$	Compacidad virtual de la mezcla.
$C$	Compacidad experimental de la mezcla.
$K_i$	Índice de compactación parcial de la clase $i$ .
$K_i$	Índice de compactación para la mezcla.

*Tabla 3.1. Notaciones MEC.*

### 3.2. Empaquetamiento virtual, empaquetamiento real.

El Modelo de Empaquetamiento Compresible (MEC) se divide en los módulos: empaquetamiento virtual y empaquetamiento real.

El primer módulo corresponde a un modelo matemático que posibilita la obtención de la máxima compacidad posible de una mezcla granular, considerando sólo las características morfológicas de las clases granulares.

El segundo módulo corresponde al empaquetamiento real de una mezcla granular obtenido por un procedimiento físico de compactación de granos.

Los dos módulos están relacionados por medio de una ecuación implícita, cuya resolución permite el cálculo de la compacidad real.

#### 3.2.1. Módulo I: Empaquetamiento virtual.

Un concepto importante para la elaboración del MEC es el de clase de grano dominante. Así, se va estableciendo que los diámetros de las clases granulares son ordenados como  $d_1 > d_2 > \dots > d_i > d_{i+1} > \dots > d_n$ , se dice que la clase granular  $i$  es dominante si esta clase asegura la continuidad sólida del cuerpo granular. Se puede probar que, una mezcla granular

sólida, tiene siempre al menos una clase dominante. Si no fuera así, tendríamos una suspensión de partículas.

Otro concepto importante para este módulo es el de compacidad virtual ( $\gamma$ ) de una mezcla granular. El empaquetamiento virtual será aquel obtenido, para una mezcla de partículas no segregadas, colocadas una a una, de forma que dejen menor volumen de huecos vacíos.

La compacidad virtual de una clase  $i$  tomada individualmente es designada por  $\beta_i$ . Entonces, el parámetro  $\beta_i$  caracteriza la potencialidad de una determinada clase de granos tiene de empaquetar. Como ejemplo, las partículas cúbicas de una misma arista tendrán la compacidad virtual  $\beta=1$ , y las partículas esféricas de un mismo diámetro tendrán  $\beta= 0,74$  (Formagini.S<sup>[9]</sup>).

La ecuación general que representa la compacidad virtual de una mezcla granular conteniendo  $n$  clases, siendo la clase  $i$  dominante, es dada por:

$$\gamma = \text{MIN}_{1 \leq i \leq n} (\gamma^i) \quad (3.1)$$

Con:

$$(3.2)$$

$$\gamma^i = \frac{\beta_i}{1 - \left[ \sum_{j=1}^{i-1} \left[ \frac{y_j}{100} \cdot \left( 1 - \beta_i + \left( 1 - \left( 1 - \frac{d_i}{d_j} \right)^{1,5} \right) \cdot \beta_i \cdot \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right) \right] - \sum_{j=i+1}^n \left[ \frac{y_j}{100} \cdot \left( 1 - \left( \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{d_i}{d_j} \right)^{1,02}} \right) \frac{\beta_i}{\beta_j} \right) \right] \right]}$$

En esta fórmula vienen dados los coeficientes que representan el efecto de alejamiento (ejercido por la clase de granos menores que los de la clase de granos mayores) y pared (ejercido por la clase de granos mayores que los de la clase de granos menores). Estos coeficientes se denominan respectivamente  $a_{ij}$  y  $b_{ij}$ , siendo:

$$a_{ij} = \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,02}} \quad b_{ij} = 1 - \left( 1 - \frac{d_i}{d_j} \right)^{1,5} \quad (3.3)$$

### 3.2.2. Módulo II: Empaquetamiento real.

Las fórmulas correspondientes al empaquetamiento virtual descritas en el apartado 3.2.1, se aplican solamente, por definición, a las compacidades virtuales y no pueden ser utilizadas directamente para la predicción de las compacidades experimentales. Por ejemplo, la compacidad virtual  $\gamma$ , describe sólo las características del material (principalmente las morfológicas). Por tanto, la compacidad experimental  $\phi$  ( $\phi < \gamma$ ) no depende sólo de la morfología de los granos, pero tampoco del protocolo de compactación. La idea es, entonces, relacionar  $\gamma$  con  $\phi$  a través de un modelo que tenga en cuenta las condiciones reales (experimentales) de compactación de la mezcla.

Se define entonces el parámetro escalar  $K$ , llamado índice de compactación, que representa aproximadamente el protocolo de empaquetamiento (energía asociada a un procedimiento operacional).

El índice de compactación  $K$  relaciona la compacidad real ( $\phi$ ) de la mezcla con las compacidades individuales de las diversas clases ( $\beta_i$ ) a través de la expresión:

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i/100}{\beta_i}}{\left(\frac{1}{\phi} - \frac{1}{\gamma_i}\right)} \quad (3.4)$$

Una vez conocido el índice  $K$ , la ecuación (3.4) se convierte en una ecuación implícita en  $\phi$ , ya que los otros valores son determinados, sea por el usuario ( $y_i$ ), sea por procedimientos experimentales ( $\beta_i$ ), sea incluso por el Módulo I de Empaquetamiento Virtual (apartado 3.2.1) representado sintéticamente por la ecuación (3.2) ( $\gamma^i$ ).

Los valores de  $K$  para los diversos tipos de protocolos de empaquetamiento (De Larrard, 1999) son los siguientes:

Protocolo de empaquetamiento		Índice $K$
Empaquetamiento seco	Precipitación simple	4,1
	Apilamiento	4,5
	Vibración	4,75
	Vibración + compactación 10 kPa	9
Empaquetamiento mojado	Demanda de agua	6,7
Empaquetamiento virtual		$\infty$

**Tabla 3.2.** Valores de  $K$  para los diferentes protocolos de empaquetamiento (De Larrard, 1999)

Conociendo los valores de  $K$  para los diversos protocolos de empaquetamiento, la ecuación (3.4) puede ser usada para la determinación experimental de la compacidad virtual de empaquetamiento ( $\beta_i$ ) de una determinada clase granular  $i$ . Para lo cual, se realiza un ensayo para la determinación de la compacidad real ( $\phi_i$ ), sometiéndose la clase granular  $i$  al protocolo de empaquetamiento (con  $K$  conocido) y se invierte la ecuación (3.4), obteniéndose la expresión:

$$\beta_i = \frac{1+K}{K} \cdot \phi_i \quad (3.5)$$

La realización de los ensayos para la determinación de la compacidad experimental debe seguir unos procedimientos bien establecidos para que exista reproductividad en los valores determinados. Al no disponer del material necesario para la realización del ensayo normalizada para la obtención de la compacidad experimental, ésta se estimó introduciendo el material en un cilindro de 30 centímetros de alto y midiendo la distancia al borde del mismo, una vez medida se colocó un peso que ocupara toda la superficie interior del cilindro (probeta) y en la mesa de sacudidas se dieron 16 golpes. Después de la sacudida se retira el peso y se mide el asentamiento del material. Conocida la masa del árido ensayado, su densidad, la geometría del recipiente, su altura y la distancia del material asentado al borde del recipiente, se introducen los datos en el Software BétonlabFree3<sup>[4]</sup>, que devuelve la compacidad experimental del material.

### 3.2.3. Ejemplo de aplicación matemática.

Para realizar una de las dosificaciones estudiadas se ha llevado a cabo mediante el programa Excel, el cálculo de la compacidad real para los áridos basálticos utilizados, teniendo en cuenta la granulometría de estos, además se ha calculado experimentalmente la compacidad tanto de la arena como de la grava. Los datos asumidos son:

-Arena: 0,6598

-Grava: 0,5923

Se asume un protocolo de empaquetamiento con índice  $K$  igual a 7, por no disponer de los medios necesarios para la realización del protocolo de empaquetamiento tal y como indica De Larrard, por lo que se toma un valor medio entre el apilamiento y la vibración más compactación de 10 kPa.

Una vez determinadas las variables, los datos disponibles son:

d (mm)	Cm	ag	af
31500	0,5923	0,00	0,00
16000	0,5923	35,69	0,00
8000	0,5923	30,01	0,00
4000	0,5923	33,94	0,00
2000	0,5923	0,00	28,54
1000	0,5923	0,00	23,95
500	0,5923	0,00	16,31
250	0,6598	0,00	11,54
125	0,6598	0,00	11,10
63	0,6598	0,00	5,85

**Tabla 3.3.** Tabla de datos para el cálculo de la compacidad real.

donde:

d: Diámetro de los tamices según **UNE-EN 933-2**<sup>[19]</sup>.

C: Compacidad experimental (obtenida por aproximación según se indica en el apartado “3.2.2. Módulo II: Empaquetamiento real”).

Ag: Porcentaje retenido del árido grueso.

Af: Porcentaje retenido del árido fino.

A continuación fijamos los porcentajes de árido fino y grueso para el primer tanteo de la compacidad real.

% combinación	
Fino	50%
Grueso	50%

**Tabla 3.4.** Porcentajes de árido grueso y árido fino.

A partir de estos porcentajes se obtiene  $y_i$  que es la porción volumétrica de la clase  $i$  en la mezcla como:

$$y_i = 0,5 \cdot a_f + 0,5 \cdot a_g \tag{3.6}$$

$y_i$
0,00
17,84
15,01
16,97
14,27
11,98
8,16
5,77
5,55
2,92

**Tabla 3.5.** Valores de  $y_i$ .

Una vez obtenido  $y_i$ , se calculan los coeficientes de alejamiento  $a_{ij}$ , y de pared  $b_{ij}$ , mediante las fórmulas (3.3) descritas en el apartado 3.2.1.

$a_{i,j}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1		1	0,712	0,504	0,357	0,252	0,179	0,126	0,089	0,063
2			1	0,712	0,504	0,357	0,252	0,179	0,126	0,090
3				1	0,712	0,504	0,357	0,252	0,179	0,127
4					1	0,712	0,504	0,357	0,252	0,179
5						1	0,712	0,504	0,357	0,253
6							1	0,712	0,504	0,358
7								1	0,712	0,506
8									1	0,715
9										1

**Tabla 3.6.** Matriz de efecto alejamiento.

b <sub>i,j</sub>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0									
1	0	1								
2	0	0,646	1							
3	0	0,350	0,646	1						
4	0	0,182	0,350	0,646	1					
5	0	0,092	0,182	0,350	0,646	1				
6	0	0,047	0,092	0,182	0,350	0,646	1			
7	0	0,023	0,047	0,092	0,182	0,350	0,646	1		
8	0	0,012	0,023	0,047	0,092	0,182	0,350	0,646	1	
9	0	0,006	0,012	0,024	0,047	0,093	0,183	0,353	0,651	1

**Tabla 3.6.** Matriz de efecto pared.

Cálculo de la compacidad virtual de cada clase granular según la fórmula (3.5) descrita en el apartado 3.2.2.

$\beta_i$
0,677
0,677
0,677
0,677
0,677
0,677
0,677
0,677
0,754
0,754
0,754

**Tabla 3.7.** Compacidad virtual para cada clase granular.

A continuación, y a partir de  $\beta_i$  la calculada, se obtiene la compacidad virtual de la mezcla ( $\gamma$ ) mediante la fórmula (3.2) definida en el apartado 3.2.2.

$\gamma$
0,34
1,37
1,13
1,00
0,94
0,91
0,91
0,92
0,93
0,95

**Tabla 3.8.** Compacidad virtual de la mezcla.

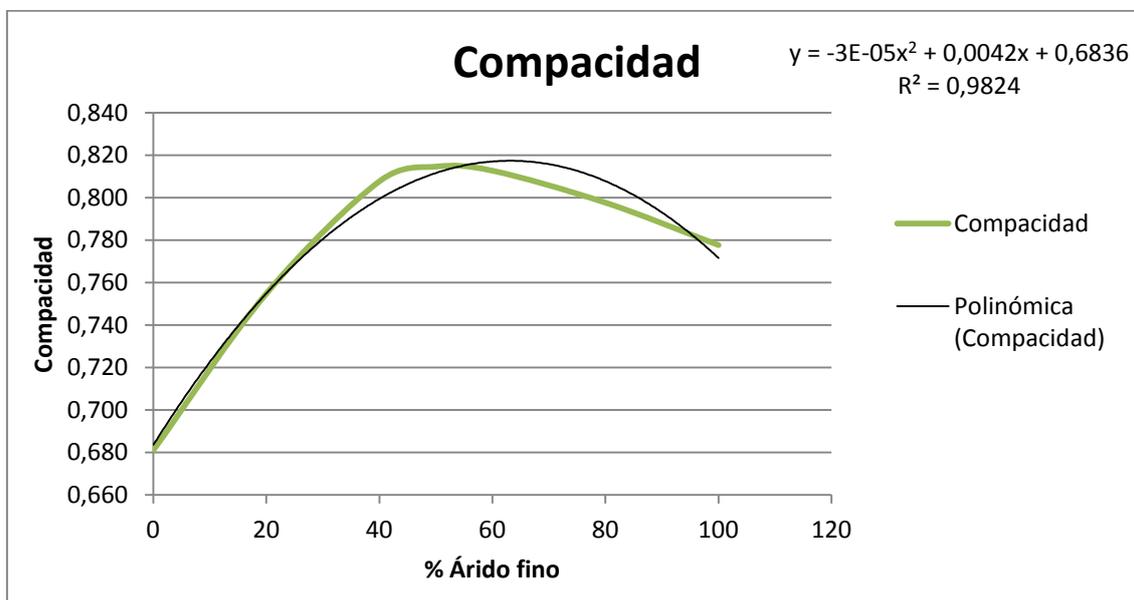
Por último se calcula la compacidad real de la mezcla, iterando el valor de  $\phi$  despejado de la fórmula (3.4) del apartado 3.2.2, hasta conseguir un  $K = 7$ .

El tanteo para el 50% de árido fino y el 50% de árido grueso da un valor de  $\phi = 0,815$ . Realizando todo el procedimiento para distintos porcentajes se obtiene la siguiente tabla:

% Árido fino	Compacidad
0	0,681
20	0,755
40	0,808
50	0,815
60	0,813
80	0,798
100	0,778

**Tabla 3.9.** Compacidad real en cada tanteo.

De la tabla anterior se extrae la siguiente gráfica de compacidad:



*Fig. 3.1. Gráfica representación de la compacidad.*

### 3.3. Aplicación del modelo al comportamiento del hormigón en estado fresco: viscosidad plástica y tensión de cizalla.

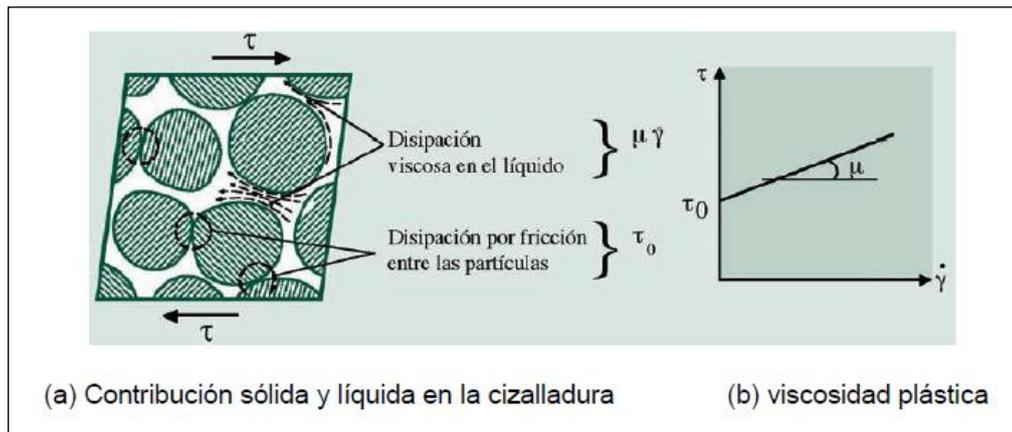
El hormigón en estado fresco es considerado un material intermedio entre un fluido y partículas húmedas empaquetadas. Es un material considerado homogéneo e incompresible que puede ser estudiado por la ciencia de la reología si obedece los siguientes criterios:

- Que no segregue durante el escurrimiento.
- Que su volumen permanezca constante durante el proceso de cizalladura, es decir, incompresible.
- Que tenga un debilitamiento mayor que 100 mm.

El modelo Bingham es utilizado por De Larrard (1999) para reproducir el comportamiento del hormigón en estado fresco, dado por la expresión:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} \quad (3.7)$$

La determinación de estos parámetros se realiza aplicando gradualmente al hormigón una tensión de cizalladura y midiendo la tasa de deformación de cizalladura. De acuerdo con De Larrard (1999), la tensión inicial de deformación ( $\tau_0$ ) es alcanzada en el instante en que el hormigón inicia su deformación (véase la figura 3.2). Esa tensión resulta de la combinación entre la fricción y la cohesión existente entre los contactos de los granos para que el material entre en movimiento. Tras el inicio de la deformación, la pendiente de la recta ajustada sobre los puntos experimentales en la gráfica  $\gamma \cdot \tau$  es la viscosidad plástica ( $\mu$ ) como indica la figura 3.2:



**Fig. 3.2.** Contribución sólida y líquida para la resistencia a cizalladura de los hormigones. (Formagini.S<sup>[9]</sup>).

### 3.3.1. Viscosidad plástica.

La viscosidad plástica del hormigón en estado fresco está asociada con la concentración normalizada de sólidos  $\phi/\phi^*$ , donde  $\phi$  es la compacidad de la pasta y  $\phi^*$  es la máxima compacidad real que la mezcla podría alcanzar, esto es, la compacidad obtenida con el protocolo de empaquetamiento correspondiente con el índice de empaquetamiento  $K=9$ . Despreciándose la cantidad de aire ocluido, con  $\phi$  obtenido de acuerdo al índice  $K$  (dado en función del protocolo adoptado) y  $\phi^*$  obtenido con  $K=9$ , la viscosidad plástica es determinada por la siguiente expresión:

$$\mu = e^{\left(26,75 \cdot \left(\frac{\phi}{\phi^*} - 0,7448\right)\right)} \quad (3.8)$$

La siguiente figura representa un gráfico comparativo entre los resultados obtenidos experimentalmente por Formagini<sup>[9]</sup> en su estudio de “Dosificación y comportamiento mecánico de conglomerantes hidráulicos de muy altas prestaciones”, para una viscosidad plástica a temperatura ambiente con el ajuste dado por la expresión (3.7), con los resultados experimentales establecidos por Ferraris et al (1998) para  $\phi/\phi^* > 0,84$  y por Fairbairn et al (2003) para  $\phi/\phi^* < 0,84$ .

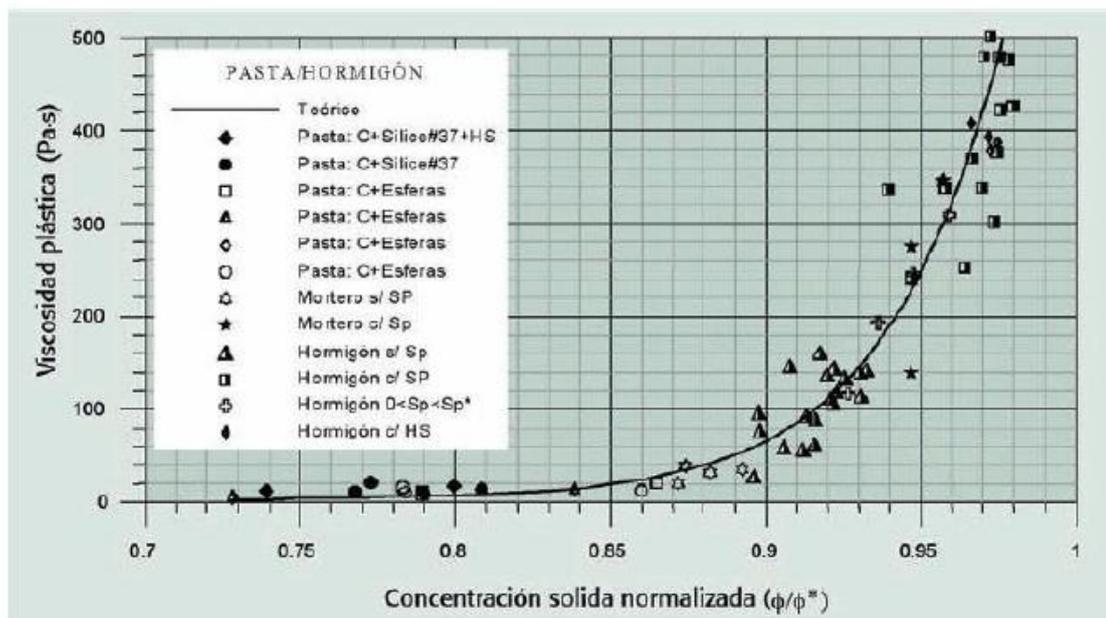


Fig. 3.3. Viscosidad plástica de pasta, morteros y hormigones. (Formagini.S<sup>[9]</sup>).

### 3.3.2. Tensión de cizalladura.

La tensión de cizalladura del hormigón está fuertemente influenciada por la incorporación de dispersantes (superplastificantes) que afectan al empaquetamiento de los materiales finos que componen la mezcla granular. Como la tensión de cizalladura está originada por la cohesión y la fricción entre los granos, en mezclas dispersas, las partículas permanecen individualizadas facilitando la movilidad entre ellas, y el valor de  $\tau_0$  será el menor del valor obtenido para las mezclas no dispersas, donde las partículas aglomeradas se descolocan en conjunto, aumentando la interconexión entre ellas.

La tensión de cizalladura de los hormigones según la presencia de dispersantes, es dada por la expresión:

$$\tau_0 = e^{(2,537 + \sum_{i=2}^N a_i K_i)} \quad (3.9)$$

donde  $K_i$  es la contribución de la fracción  $i$  para el índice de compactación de la mezcla, dada por la expresión:

$$K_i = \frac{\phi_i/\phi_i^*}{1-\phi_i/\phi_i^*} \quad (3.10)$$

Siendo  $\phi_i$  el volumen de sólidos de la clase  $i$ ;  $\phi_i^*$  el máximo volumen que la clase  $i$  puede ocupar en presencia de otras clases; los términos  $a_i$  son coeficientes relacionados con la dimensión de los granos (con el  $d_i$  en mm, correspondiendo al valor medio acumulado del 50%) los cuales son establecidos por la ecuación empírica:

$$a_i = 0,736 - 0,216 \cdot \log(d_i) \quad (3.11)$$

La presencia de dispersantes en la mezcla altera la tensión de cizalladura ( $\tau_0$ ), reduciéndola debido a la rotura de los aglomerantes. La ecuación empírica establecida para el valor de la tensión de cizalladura, considerando la presencia de dispersante, es dada por:

$$\tau_0 = e^{(2,537 + b_i K_c + \sum_{i=2}^N a_i K_i)} \quad (3.12)$$

donde  $K_c$  es la contribución de la fracción de cemento para el índice de compactación de la mezcla, y  $b_i$  es un coeficiente asociado al cemento como dependiente del porcentaje del dispersante en la mezcla (una vez que el efecto del dispersante actúa sobre las partículas del cemento). El coeficiente  $b_i$  es dado por la siguiente ecuación:

$$b_i = 0,224 + 0,910 \cdot \left(1 - \frac{S_p}{S_p^*}\right) \quad (3.13)$$

donde  $S_p$  y  $S_p^*$  corresponden a la dosificación del dispersante y a su punto de saturación en la mezcla, respectivamente.

### 3.4. Aplicación del modelo al comportamiento del hormigón en estado endurecido: resistencia a compresión y módulo de elasticidad.

#### 3.4.1. Resistencia a compresión.

La resistencia a compresión de la pasta de cemento es dada por la expresión:

$$f_{cp} = 11,4 R_{C(t)} \left[ \frac{v_c}{v_c + v_w + v_{ar}} \right]^{2,85} \quad (3.14)$$

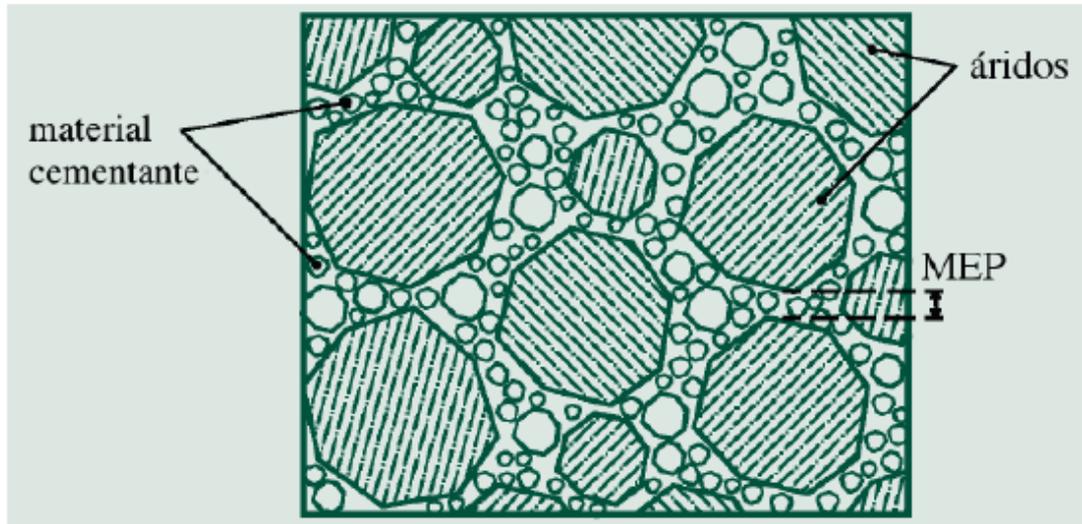
donde  $R_{C(t)}$  es la resistencia a compresión del cemento en el tiempo  $t$  (MPa);  $v_c$  es el volumen de cemento presente en un volumen unitario de pasta;  $v_w$  es el volumen de agua presente en un volumen unitario de pasta;  $v_{ar}$  es el volumen de aire encerrado en un volumen unitario de pasta.

La influencia de los áridos se da por efecto de la tipología y por efecto del tipo de árido.

El volumen y la dimensión máxima de los áridos también afectan a la resistencia a compresión del hormigón (Stok et al, 1979) y (Walker et al, 1960), siendo necesario definir un parámetro que tenga en cuenta estos dos efectos. Este parámetro es la distancia media entre los áridos inmersos en la matriz, llamada MEP (considerando el material seco empaquetado en el cual está insertada una pasta de cemento) ilustrada en la figura que sigue a la ecuación que la define:

$$MEP = D \left[ \sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right] \quad (3.15)$$

donde  $D$  es el valor correspondiente al 90% del árido que pasa por el tamiz previamente definido;  $g$  es el volumen de los áridos en un volumen unitario de hormigón;  $g^*$  equivale a la máxima compacidad posible de ser obtenida por un proceso experimental para el árido ( $K=9$ ).



*Fig. 3.4. Máximo espesor de la pasta en una mezcla seca (Formagini.S<sup>[9]</sup>).*

Siendo así, el modelo para el cálculo de la resistencia a compresión del hormigón conteniendo áridos con dimensión máxima de  $600\mu\text{m}$ , considerando la resistencia a compresión de cemento, la concentración del cemento de la pasta en estado fresco y los efectos de la MEP, es el dado por la expresión:

$$f_{cm} = f_{cp} \cdot \text{MEP}^{-0,13} \quad (3.16)$$

### 3.4.2. Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad del hormigón depende directamente de los módulos de elasticidad de los áridos y de la matriz. Como la dimensión máxima del árido es de  $600\mu\text{m}$  (ausencia de árido grueso), el módulo de elasticidad del hormigón producido con esas características equivale al módulo de elasticidad de la matriz ( $E_m$ ), dado por la expresión:

$$E_m = 226 \cdot f_{cm} \quad (3.17)$$

### 3.5. Software BétonlabFree 3.

Se ha utilizado este software para simular una serie de amasadas obteniendo datos necesarios, que normalmente se obtienen realizando las amasadas reales, con el gasto material que ello conlleva.

A continuación se detalla cómo introducir los datos necesarios en el programa para obtener las amasadas de prueba con sus características esperables.

Para ello, se realiza un ejemplo con las siguientes especificaciones:

- $C+kA= 280 \text{ kg/m}^3$
- $E_{\text{eff}}/(C+kA) \leq 0,60$
- $10 \text{ cm} \leq \text{asentamiento} \leq 15 \text{ cm}$
- $R_{c28} \geq 42 \text{ MPa}$
- $K \leq 7,5$

En primer lugar se seleccionan los constituyentes del hormigón, en el menú “Sélection”, en la ventana que aparece. Se selecciona uno de los dossiers en el cuadro de “Dossiers disponibles”, y los materiales elegidos en el cuadro “Constituants disponibles”, una vez aparecen en el último cuadro los materiales que se ha seleccionado, se acepta. En caso de equivocación es posible eliminar el material erróneo.

Al pulsar “OK” el programa permite acceder a los cálculos en la pestaña “Calculs” del menú principal.

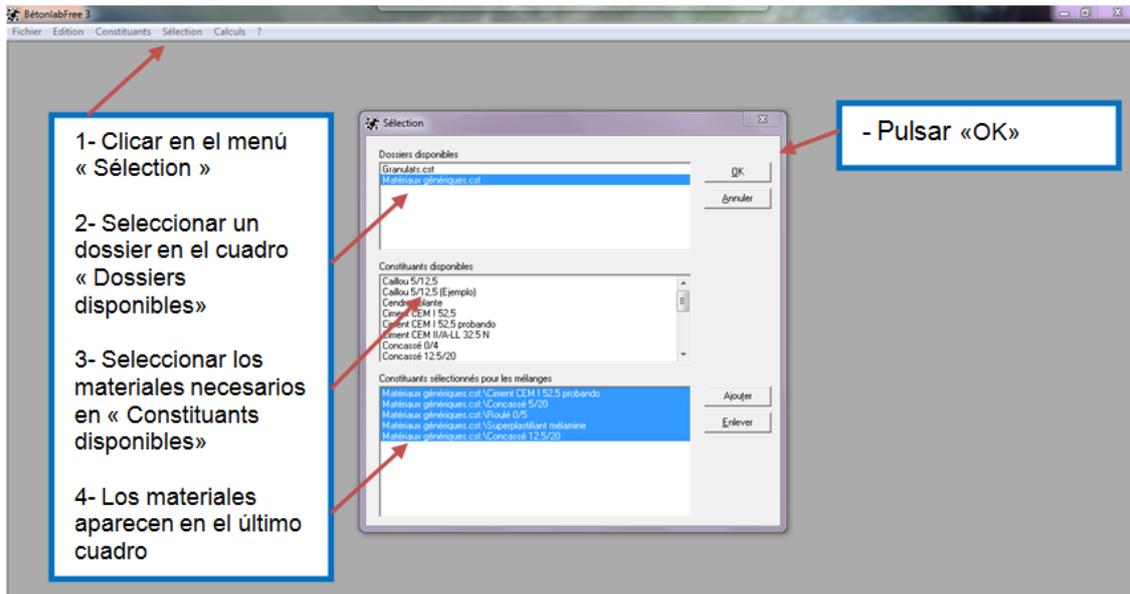


Fig. 3.5. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.

A continuación, se pulsa el menú “Calculs”, que abre la ventana de opciones de cálculo, en ella se han de marcar las propiedades a las que se desee añadir datos. En la pestaña “Info” es posible acceder a la lista de parámetros de los componentes para el cálculo de las propiedades del hormigón que no están disponibles:

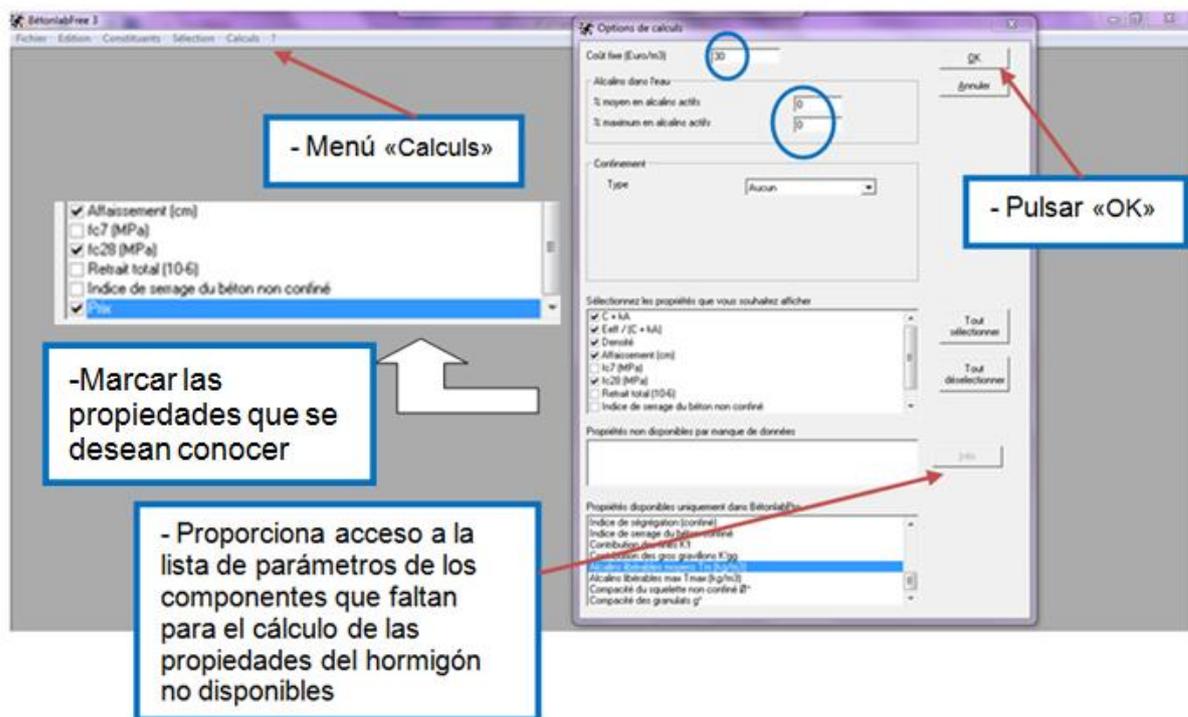
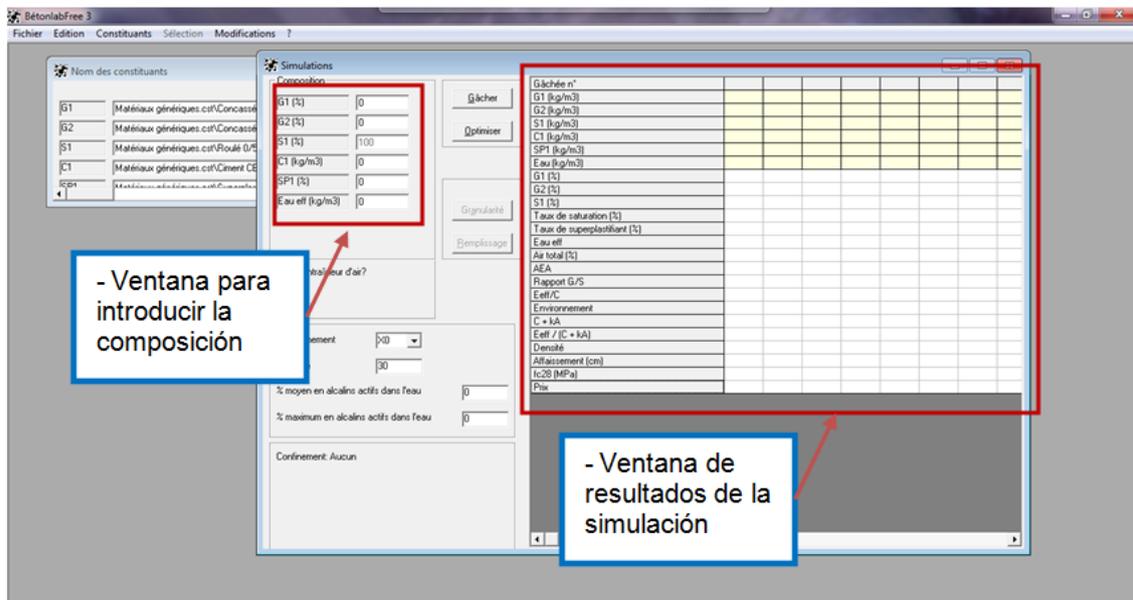


Fig. 3.6. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.

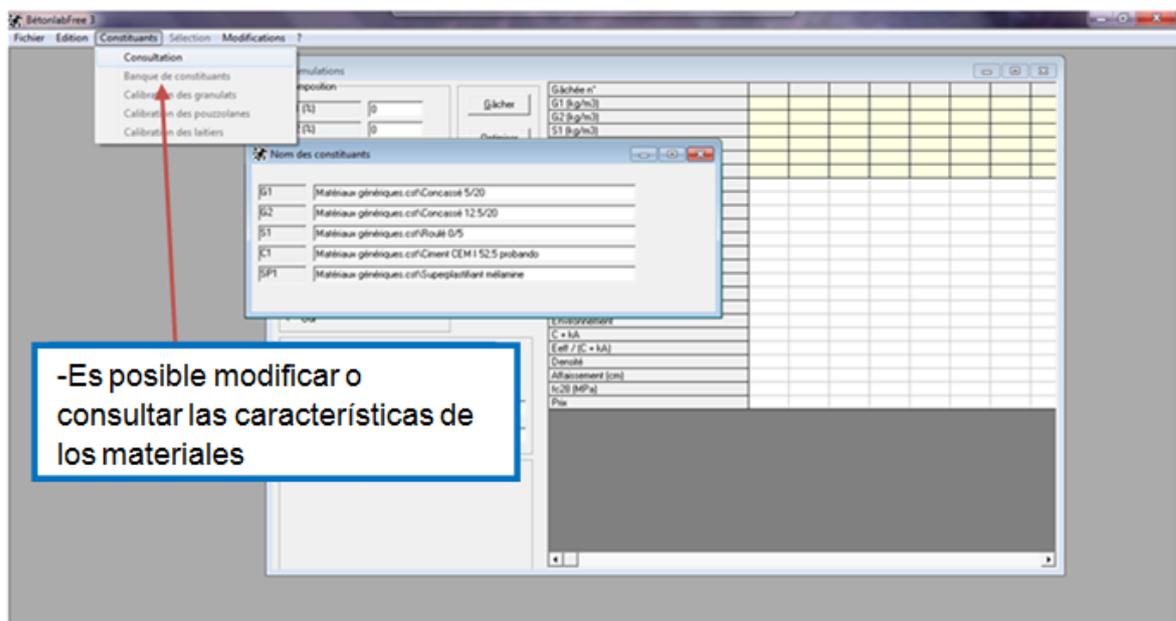
-Introducción de una fórmula y sus ajustes:

Al pulsar “OK” se abre una ventana en la que se pueden introducir los datos de la composición del hormigón y que generará los resultados de la simulación.



*Fig. 3.7. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.*

En este punto se pueden revisar y modificar los materiales seleccionados y sus características.



*Fig. 3.8. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.*

Se introducen las cantidades de cada componente, teniendo en cuenta las unidades, y se pulsa “Gâcher” para ver las propiedades de la primera amasada.

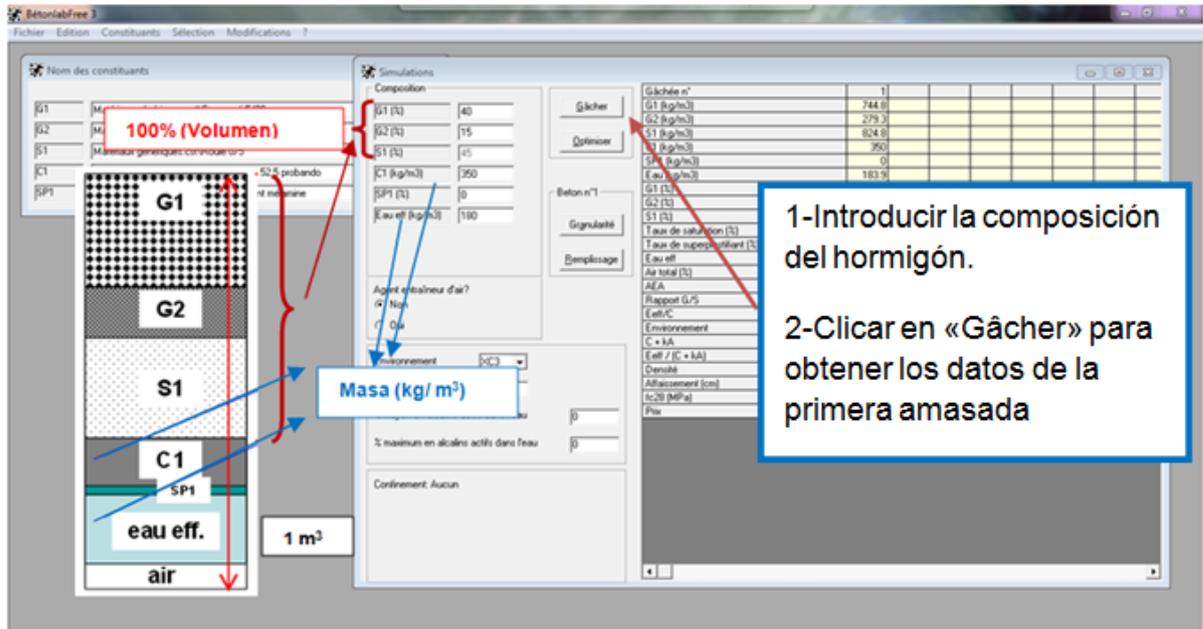


Fig. 3.9. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.

En la siguiente imagen se observa cómo el programa ajusta la cantidad de agua necesaria.

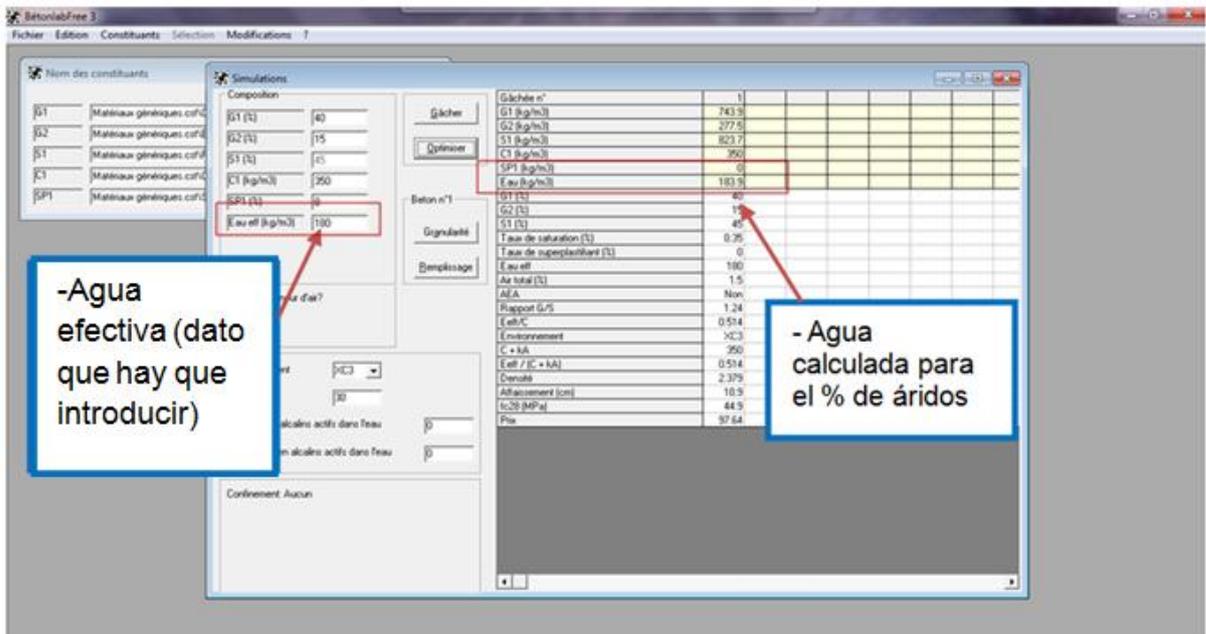


Fig. 3.10. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.

El programa también pasa el porcentaje de superplastificante, áridos y adiciones a  $\text{Kg/m}^3$ :

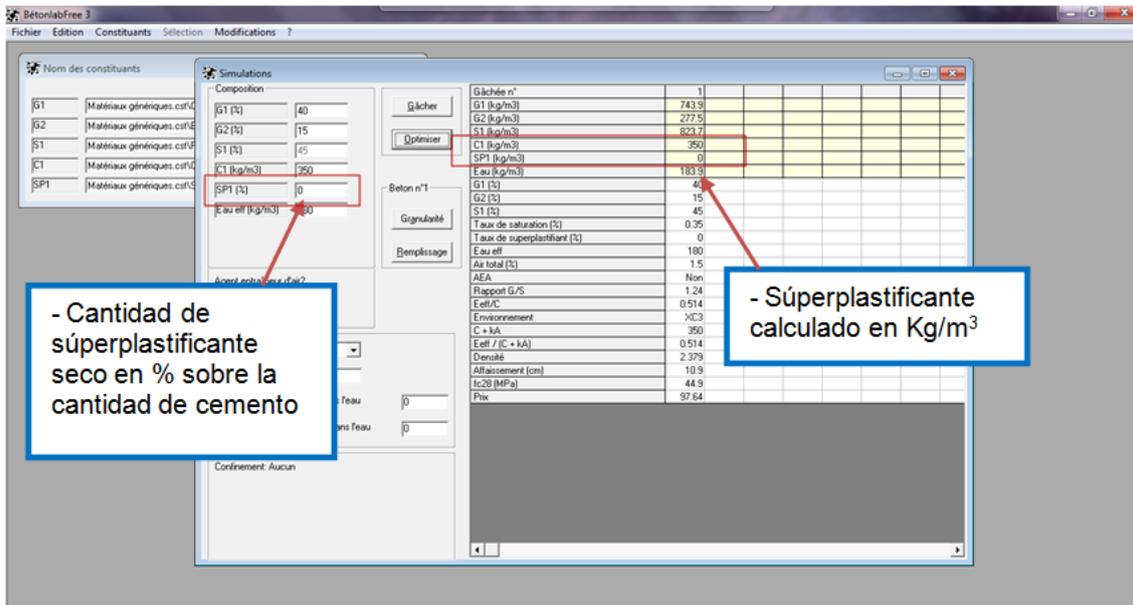


Fig. 3.11. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.

En el apartado “Environnement” se selecciona la clase de exposición ambiental según la norma UNE- EN 206<sup>[17]</sup>. En esta norma se puede buscar la equivalencia para las clases de exposición definidas en la EHE-08<sup>[5]</sup>.

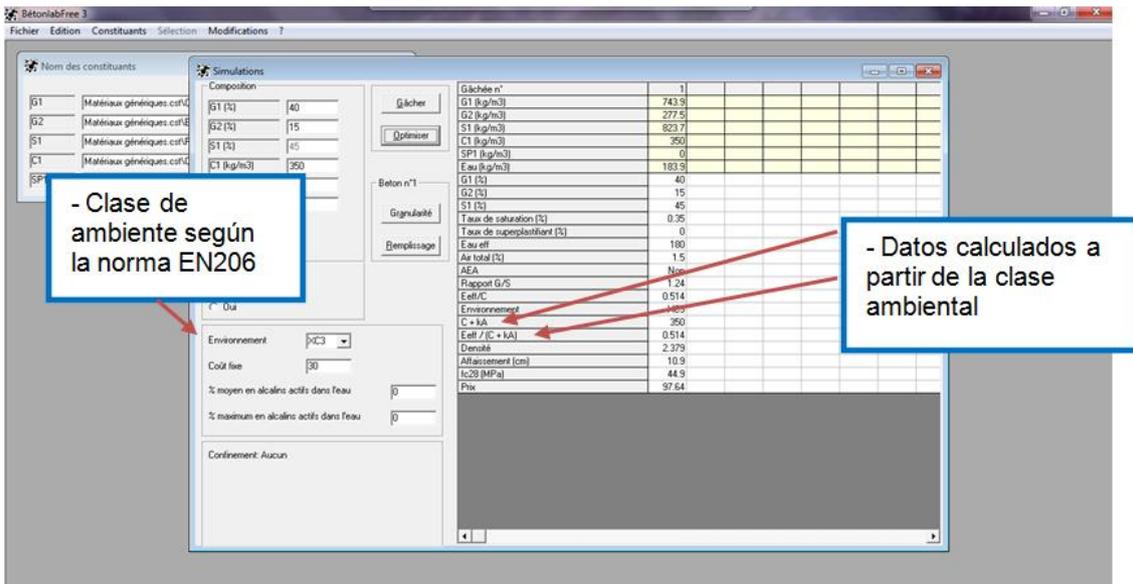


Fig. 3.12. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.

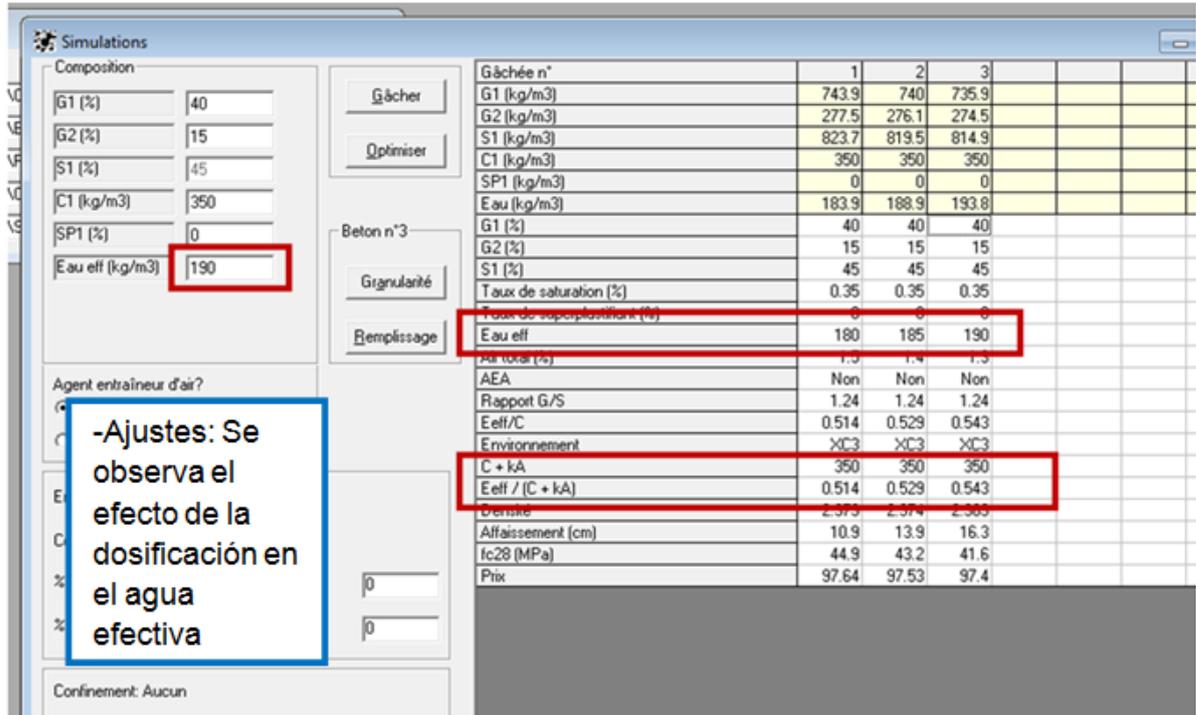


Fig. 3.13. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.

El programa permite modificar cada amasada clicando sobre su número de la tabla, aparecen los datos introducidos para ese caso y pueden ser revisados. También es posible eliminar la columna señalándola y pulsando suprimir en el teclado.

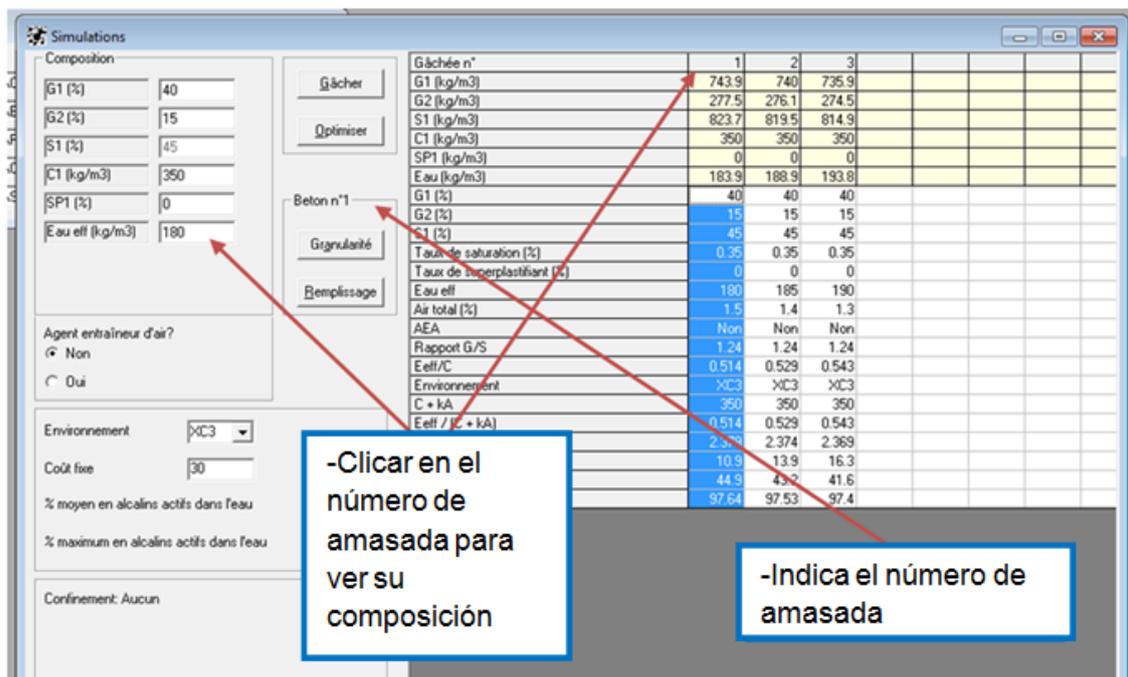


Fig. 3.14. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.

En este punto es interesante ir variando la relación agua/cemento y otros constituyentes para llegar a la amasada con mejores características.

Se observa el índice de compactación y su relación con los áridos y se toma el valor de áridos que dé una mejor compactación, se fija esa cantidad para ese árido y se va variando la cantidad de agua para obtener distinta consistencia o con el cemento para obtener mayores resistencias, hasta obtener el hormigón óptimo:

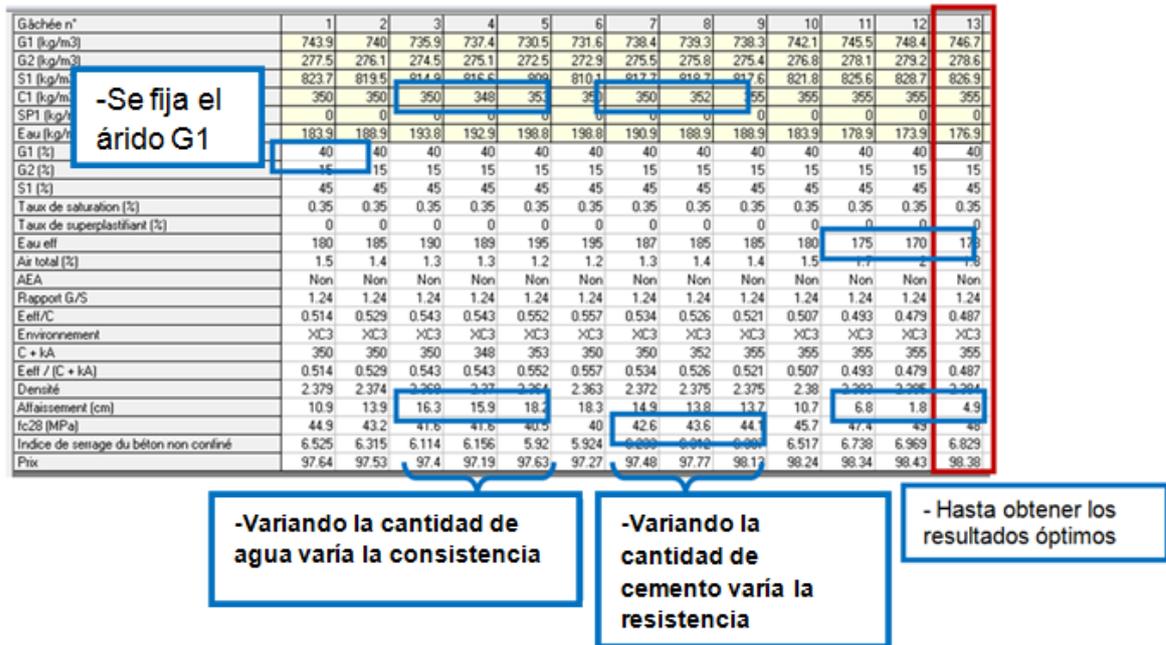


Fig. 3.15. Ejemplo del Software BétonlabFree 3.

Es así como De Larrard ofrece un programa capaz de realizar amasadas virtuales con el cual se observa cuál de ellas aportará las características necesarias, resistencias, densidad, ect. La utilización de este programa ayudará a ahorrar tanto tiempo como dinero al realizar amasadas de prueba, y además, al crear menos residuos, contribuye al medio ambiente.

## CAPÍTULO 4. FASE EXPERIMENTAL

## 4. Fase experimental.

### 4.1. Caracterización de los materiales

#### 4.1.1 Cemento:

Para elaborar las probetas se han utilizado dos tipos de cemento, uno para las seis primeras amasadas, el cemento puzolánico CEM IV/B (P) 32,5 N, y otro para la séptima y última amasada, el CEM I 52,5R, con el que se trató de mejorar las resistencias del hormigón. La densidad del cemento se estimó como 3,1 kg/dm<sup>3</sup> siguiendo lo indicado por Fernández Cánovas en su libro “Hormigón”<sup>[7]</sup>.

Tipo	Denominación	Designación	Composición (proporción en masa <sup>1)</sup> )										Componentes minoritarios	
			Componentes principales								Caliza <sup>2)</sup>			
			Clinker K	Escoria de horno alto S	Humo de sílice D <sup>3)</sup>	Puzolana		Cenizas volantes		Esquistos calcinados T	L	LL		
Natural P	Natural calcinada Q	Silíceas V				Calcefusas W								
CEM I	Cemento pórtland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento pórtland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento pórtland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento pórtland con puzolana	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento pórtland con cenizas volantes	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	Cemento pórtland con esquistos calcinados	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
	Cemento pórtland con caliza	CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Cemento pórtland mixto <sup>3)</sup>	CEM II/A-M	80-94	«----- 6-20 -----»								-	-	0-5
CEM II/B-M		65-79	«----- 21-35 -----»								-	-	0-5	
CEM III	Cemento con escorias de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico <sup>3)</sup>	CEM IV/A	65-89	-	«----- 11-35 -----»					-	-	0-5		
		CEM IV/B	45-64	-	«----- 36-55 -----»					-	-	0-5		
CEM V	Cemento compuesto <sup>3)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	«----- 18-30 -----»			-	-	-	0-5		
		CEM V/B	20-38	21-50	-	«----- 31-50 -----»			-	-	-	0-5		

Tabla 4.1. Tabla de cementos comunes. [Tomada de la RC-08<sup>[16]</sup>]

#### 4.1.2. Áridos:

Los áridos utilizados son áridos basálticos con el mismo origen para todas las amasadas, con una densidad estimada de 2,6 kg/dm<sup>3</sup> (Gallego, C. <sup>[10]</sup>).

La granulometría de los áridos se detalla en el apartado 4.2.1 en la tabla “4.1 Granulometría de los áridos utilizados”, una vez separadas la arena y la grava se estimó su compacidad según el procedimiento indicado en el apartado 3.2.2 de este estudio:

Compacidad	
Arena	0,5923
Grava	0,6598

**Tabla 4.2.** Compacidad experimental de los áridos.



**Fig. 4.1.** Análisis granulométrico de los áridos.

#### 4.1.3. Humo de sílice:

El humo de sílice que se utiliza para aumentar la cohesión del hormigón fresco y las resistencias mecánicas y a agentes agresivos en el hormigón endurecido.

El humo de sílice empleado en la elaboración de las amasadas fue Sika Fume S-92 D, en un 10% de la cantidad de cemento, con una densidad de 2,2 kg/dm<sup>3</sup> (Formagini, S <sup>[7]</sup>).

Según establece Sika en su hoja de datos del producto, este contiene partículas microscópicas (0,1 micras) de dióxido de silicio reactivo. La presencia de dichas sustancias aumenta la retención del agua en el hormigón fresco. En el hormigón endurecido reacciona

con la cal libre aumentando sus resistencias mecánicas y a agentes agresivos. Aumenta las resistencias químicas a cloruros, sulfatos, ácidos, ciclos de hielo-deshielo, reacción álcali-árido. No contiene cloruros ni elementos que puedan producir corrosión en las armaduras.

#### **4.1.4 Tipo y características del aditivo:**

El aditivo utilizado fue un superplastificante de alto rendimiento a base de copolímeros vinílicos modificados, Sikament HS1 de la empresa Sika, con una densidad de 1,23 Kg/l, pH aproximado de 9 y exento de cloruros.

## **4.2. Elaboración de los hormigones.**

La elaboración de los hormigones se llevó a cabo en el laboratorio de laboratorio de Química y Materiales la Escuela Superior Politécnica de Ingeniería, en la sección de Arquitectura Técnica de la Universidad de La Laguna

### **4.2.1 Dosificaciones:**

Las dosificaciones empleadas para la realización de las distintas amasadas se llevaron a cabo partiendo de una cantidad de cemento de 450 kg, añadiéndole un diez por ciento de humo de sílice y variando para cada amasada la cantidad de agua según la relación agua/cemento efectiva que se quería obtener. Para cada proporción de áridos se realizó una amasada con relación agua/cemento efectiva de 0,60 y otra de 0,48, excepto para la amasada número seis que debido a las características de su dosificación fue necesario aumentar la relación agua/cemento efectiva a 0,55. En todas las amasadas se utilizaron 27 gramos de superplastificante a base de copolímeros vinílicos modificados Sikament HS1.

Las relaciones agua/cemento efectivas se han obtenido teniendo en cuenta las adiciones empleadas, humo de sílice en este caso, cuyo coeficiente K debe estar entre 1 y 2 como indica la EHE-08 <sup>[5]</sup> en su artículo 37.3.2. En este estudio se ha toma K=2 para la obtención de la relación agua/cemento efectiva.

Una vez obtenidas las cantidades en peso de cemento, humo de sílice, agua, arena, grava y aditivo se calcularon las cantidades necesarias de cada elemento para obtener el volumen de hormigón para realizar tres probetas.

- **Amasadas 1 y 2:**

Las amasadas 1 y 2 se realizaron con el árido comercial sin modificar la granulometría, tras la realización del análisis granulométrico para conocer su exacta. Dicho análisis dio lugar a la siguiente tabla:

Tamaño de abertura del tamiz	Masa de material retenido (Ri) en gramos			Porcentajes acumulados que pasan $(100 - \sum(Ri/Mi*100))$		
	Arena	Grava	Revuelto	Arena	Grava	Revuelto
31,5	0,00	0,00	0,00	100	100	100
16	0,00	654,00	654,00	100	64,31	83,70
8	0,00	550,00	550,00	100	34,30	69,99
4	0,00	622,00	622,00	100	0,35	54,49
2	622,00	0,00	622,00	71,46	0	38,98
1	522,00	0,00	522,00	47,51	0	25,97
0,5	355,50	0,00	355,50	31,20	0	17,11
0,25	251,50	0,00	251,50	19,66	0	10,84
0,125	242,00	0,00	242,00	8,56	0	4,81
0,063	127,50	0,00	127,50	2,71	0	1,63
Fondo	56,50	0,00	56,50	0,11	0	0,22
Total	2177	1826	4003			

**Tabla 4.3.** *Granulometría de los áridos utilizados.*

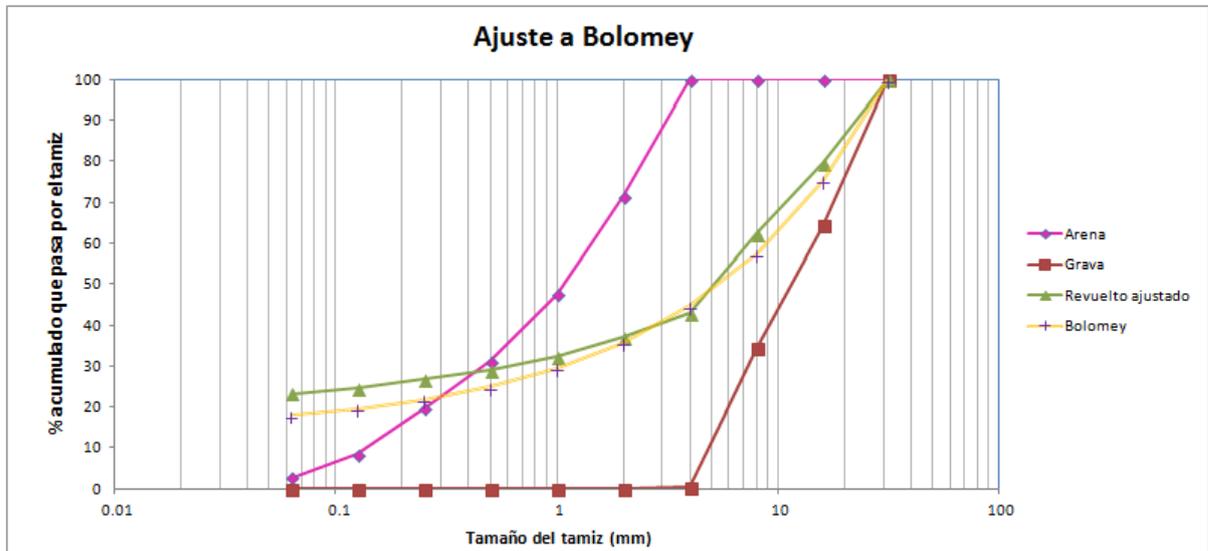
Una vez conocida la composición de los áridos, se utilizó el revuelto completo para la dosificación de las dos primeras amasadas, en la siguiente tabla se especifica la dosificación para cada una de ellas.

	Amasada 1	Amasada 2
	a/c efectiva	
	0,60	0,48
Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N	
Material	Peso para 3 probetas (Kg)	
Cemento	8,10	8,10
Húmo de sílice	0,81	0,81
Agua	5,83	4,67
Áridos	25,02	25,02
Aditivo	0,027	0,027

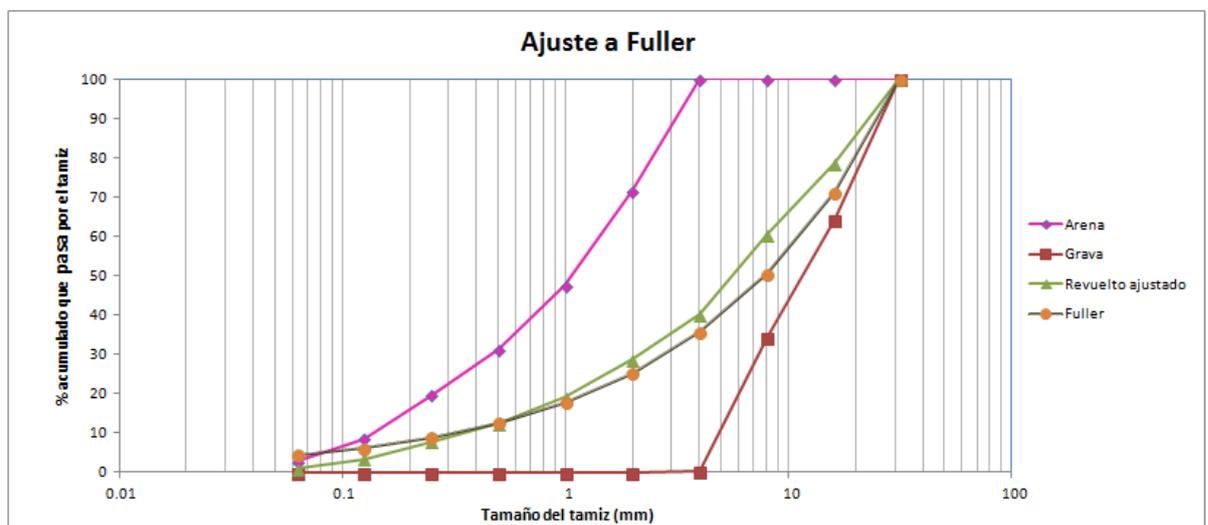
**Tabla 4.4.** *Dosificación amasadas 1 y 2.*

**- Amasadas 3 y 4:**

Para la realización de estas amasadas se buscó el ajuste de los áridos tanto a la curva Fuller como a la de Bolomey, obteniendo las siguientes gráficas:



*Fig. 4.2. Ajuste de los áridos a la curva de Bolomey.*



*Fig. 4.3. Ajuste de los áridos a la curva de Fuller.*

Puesto que el ajuste de Bolomey era más claro, además de que cuenta con el porcentaje de cemento, se tomó el ajuste de Bolomey como el adecuado para la realización de las amasadas 3 y 4, el cual daba los siguientes porcentajes de arena y grava:

Amasadas 3 y 4	
Arena	Grava
20%	57%

**Tabla 4.5.** Porcentajes del ajuste de Bolomey.

Estos porcentajes de arena y grava dieron lugar a la siguiente dosificación para cada una de las amasadas 3 y 4:

	Amasada 3	Amasada 4
	a/c efectiva	
	0,60	0,48
Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N	
Material	Peso para 3 probetas (Kg)	
Cemento	8,10	8,10
Húmo de sílice	0,81	0,81
Agua	5,83	4,67
Arena	6,56	7,17
Grava	18,70	20,43
Aditivo	0,027	0,027

**Tabla 4.6.** Dosificación amasadas 3 y 4.

- **Amasadas 5 y 6:**

Las amasadas 5 y 6 se realizaron según el Método de Empaquetamiento Compresible y siguiendo los pasos descritos en el capítulo 3 del presente estudio, apartado “3.2.3 Ejemplo de aplicación matemática”.

Tras realizar las iteraciones necesarias para cada porcentaje de áridos, se observa que la máxima compacidad se obtiene con un 50% de arena y un 50% de grava:

% Árido fino	Compacidad
0	0,681
20	0,755
40	0,808
50	0,815
60	0,813
80	0,798
100	0,778

**Tabla 4.7.** Relación del porcentaje de árido fino y la compacidad.

Al aplicar estos porcentajes en la dosificación, obtenemos los siguientes pesos para las amasadas 5 y 6:

	Amasada 5	Amasada 6
	a/c efectiva	
	0,6	0,55
<b>Tipo de cemento</b>	CEM IV/B (P) 32,5N	
<b>Material</b>	Peso para 3 probetas (Kg)	
Cemento	8,10	8,10
Húmo de sílice	0,81	0,81
Agua	5,83	5,40
Arena	12,53	14,04
Grava	12,53	14,04
Aditivo	0,027	0,027

*Tabla 4.8. Dosificación amasadas 5 y 6.*

- **Amasada 7:**

La amasada número 7 se realizó a partir de la dosificación amasada 4 por ser con la que se obtuvieron mejores resultados. Por lo tanto, la dosificación de esta amasada 7 cuenta con un 20% de arena y un 57% de grava, valores obtenidos a partir del ajuste granulométrico por la curva de Bolomey. Esta masada se diferencia de la 4 por haber empleado en su realización un cemento CEM I 52,5R en lugar del CEM IV/B (P) 32,5N que se utilizó en el resto de amasadas.

Amasada 7	a/c efectiva
	0,48
<b>Tipo de cemento</b>	CEM I 52,5R
<b>Material</b>	Peso para 3 probetas (Kg)
Cemento	8,10
Húmo de sílice	0,81
Agua	4,67
Arena	7,17
Grava	20,43
Aditivo	0,027

*Tabla 4.9. Dosificación amasada 7.*

#### 4.2.2 Amasado, consolidación y curado de las probetas:

El amasado del hormigón se ha realizado en una hormigonera basculante de aproximadamente 100 dm<sup>3</sup> de capacidad. El tiempo del amasado ha sido el necesario para obtener una mezcla homogénea, no superando nunca los tres minutos de amasado.

En función de la consistencia obtenida al realizar el ensayo de consistencia, deberá emplearse el procedimiento de compactación que mejor se adapte a las condiciones particulares de la masa. Para la elección del método de compactación, la EHE-08<sup>[5]</sup>, en su artículo 71.5.2 “Compactación del hormigón” indica, a título meramente informativo, mediante la tabla 70.2, el medio de compactación más recomendable según los valores de consistencia obtenidos.

Consistencia (Apartado 31.5)	Tipo de compactación
Seca	Vibrado energético
Plástica	Vibrado normal
Blanda	Vibrado normal o picado con barra
Fluida	Picado con barra

**Tabla 4.10.** Tipos de compactación. [ Art 71.5.2 EHE-08<sup>[5]</sup>]

El curado de todas las probetas realizadas se llevó a cabo durante 28 días, sumergidas en una piscina con una temperatura media de 16 grados centígrados.



**Fig. 4.4.** Imagen del proceso de elaboración de las probetas.

### 4.3. Ensayos de consistencia:

Para determinar la consistencia del hormigón fresco se ha seguido lo establecido en la norma **UNE-EN 12350-2**<sup>[22]</sup>.

#### Fundamento:

El hormigón fresco se compacta en un molde con forma de tronco de cono. Cuando el molde se saca, levantándolo en dirección vertical, el descenso producido por el asiento del hormigón da una medida de su consistencia.

#### Material y equipos:

- **Molde para conformar la probeta de ensayo:** El molde debe tener forma de tronco de cono con las siguientes dimensiones interiores (cono de Abrams): diámetro de la base:  $(200 \pm 2)$  mm; diámetro de la parte superior:  $(100 \pm 2)$  mm; y altura:  $(300 \pm 2)$  mm.

La base y la parte superior deben estar abiertas y deben ser paralelas entre sí, formando ángulo recto con el eje del cono. El molde debe estar provisto, en la parte superior, de dos asas, y en la parte inferior de dos grapas de fijación o piezas fijas de pie para sostenerlo firmemente.

- **Barra compactadora**, de sección transversal circular, recta, fabricada con acero, con un diámetro de  $(16 \pm 1)$  mm, y de  $(600 \pm 5)$  mm de longitud, y con su extremos redondeados.

- **Tolva de llenado** (opcional), **regla graduada** desde 0 mm a 300 mm, y **bandeja/chapa de base**.

#### Muestra para el ensayo:

La muestra de hormigón se debe obtener según lo indicado en la norma EN 12350-1<sup>[21]</sup>. La muestra debe homogeneizarse utilizando el recipiente de reamasado y la pala cuadrada antes de realizar el ensayo.

Procedimiento:

Se humedece el molde y la bandeja base y se coloca el molde sobre la bandeja base en una superficie horizontal. Durante el proceso de llenado se agarra o sujeta el molde firmemente contra la bandeja base, bien anclándolo perfectamente o bien pisando en las dos piezas de pie.

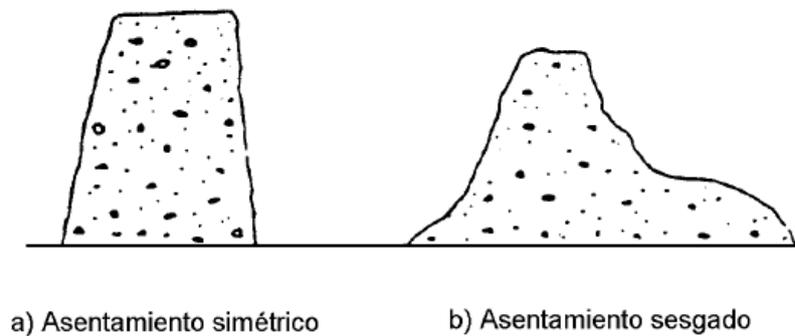
Se llena el molde en tres capas, de modo que cada una ocupe aproximadamente un tercio de la altura del molde una vez compactado el hormigón. Se compacta cada capa con 25 golpes con la barra compactadora. Se distribuyen uniformemente los golpes en la sección transversal de cada capa. Para la capa inferior, se necesitará inclinar ligeramente la barra compactadora y posicionar la mitad de los golpes aproximadamente en forma espiral hacia el centro. Se compacta la segunda y la última capa a lo largo de toda su altura, de forma que la barra penetre ligeramente en la capa inferior. En el llenado y compactado de la última capa, se procurará que el hormigón rebose antes de comenzar el proceso de compactado.

Si como consecuencia del proceso de compactado de la última capa resultase que falta hormigón y que por tanto está por debajo del nivel superior del molde, se añade más hormigón para que siempre haya exceso sobre el nivel superior del molde. Después de compactar la última capa, se retira el hormigón sobrante por medio de una acción de corte y rodillo de la barra compactadora, y a continuación se retira el hormigón sobrante de la superficie o placa base.

Se levanta el molde con cuidado en dirección vertical. La operación de levantar el molde debe realizarse en un tiempo de 5 s a 10 s, de una manera uniforme, sin causar al hormigón ningún movimiento lateral o de torsión. La operación completa, desde el comienzo del llenado del molde hasta la retirada del mismo, será realizada sin interrupción y debe completarse en un tiempo no superior a 150 s. Inmediatamente después de retirar el molde, se mide y registra el asentamiento (h) determinando la diferencia entre la altura del molde y la del punto más alto de la probeta de hormigón asentada.

Resultado:

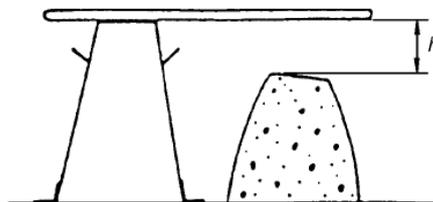
El ensayo solamente es válido si se produce un correcto asentamiento de la masa de hormigón, es decir un asentamiento en el cual el hormigón permanece sustancialmente intacto y de forma simétrica como se muestra en la figura (a) siguiente. Si se produce una caída lateral de la muestra, como se muestra en la figura (b), se debe tomar otra muestra de hormigón y repetir el procedimiento.



**Fig. 4.5.** Formas de asentamiento [UNE-EN 12350-2<sup>[22]</sup>].

Si dos ensayos consecutivos muestran que una parte del hormigón se desprende de la masa de la probeta de ensayo, el hormigón carece de la necesaria plasticidad y cohesión para que el ensayo de asentamiento sea adecuado.

La medida del asentamiento válido ( $h$ ) se registra como se indica en la figura siguiente, redondeado a los 10 mm.



**Fig. 4.6.** Medida del asentamiento [UNE-EN 12350-2<sup>[22]</sup>].



*Fig. 4.7. Ejemplo de medida de cono de Abrams.*

A partir de la medida de la consistencia por el ensayo de asentamiento, se determina el valor de la docilidad del hormigón. Las distintas consistencias y los valores límite del asentamiento del cono las determina la EHE-08<sup>[5]</sup> en su artículo 31.5 “Docilidad del hormigón” y viene dado por la siguiente tabla:

Tipo de consistencia	Asentamiento en cm
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
Fluida (F)	10-15
Líquida (L)	16-20

*Tabla 4.11. Tipos de consistencia.[ Art 31.5 EHE-08<sup>[5]</sup>].*

En los casos en los que no ha sido posible medir el asentamiento en el cono de Abrams, por superar este los 20 centímetros, se ha medido el diámetro de la pasta tras su escurrimiento del cono.

El procedimiento es el mismo que para medir el asentamiento, pero por el contrario, una vez retirado el Cono de Abrams, se mide el diámetro de la pasta en su punto de mayor valor.



*Fig. 4.8. Medida del escurrimiento.*

En el momento de la medida, tanto de escurrimiento como de asentamiento, se ha observado el aspecto de la masa para comprobar si existe segregación de la masa.

#### **4.4. Ensayo de densidad.**

La medida de la densidad de las amasadas confeccionadas ha sido tomada tras el desmolde de las probetas en el día 1, así como a la semana de edad de las muestras y a los 28 días.

El procedimiento seguido consiste en el pesado de la probeta y posterior cálculo de su densidad a partir del volumen de la probeta.

$$\rho(\text{kg/m}^3) = \frac{\text{Peso probeta (kg)}}{\text{Volumen probeta (m}^3\text{)}} \quad (4.1)$$

## 4.5. Ensayo de resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica de un hormigón saturado en agua es una medida indirecta de la conectividad y tamaño de sus poros. En un hormigón no saturado es una indicación del grado de saturación.

Para este estudio se han realizado mediciones de la resistividad eléctrica por el método directo, y por el método indirecto también llamado de las cuatro puntas o de Wenner.

Las medidas se han realizado para cada amasada en el día uno, tras desmoldar las probetas, en el día siete y a los 28 días de edad de las probetas.

Antes de especificar los métodos de medida, se dan las definiciones necesarias para este ensayo:

### **Resistencia eléctrica del hormigón ( $R_e$ ):**

Relación entre la diferencia de potencial ( $V$ ) entre los electrodos y la intensidad de corriente ( $I$ ) que circula por el interior de la probeta o testigo.

### **Resistencia eléctrica de las esponjas ( $R_{sp}$ ):**

Relación entre la diferencia de potencial ( $V$ ) entre los electrodos y la intensidad de corriente ( $I$ ) que circula por las dos esponjas colocadas una contra otra.

### **Resistividad eléctrica del hormigón ( $\rho_e$ ):**

Resistencia eléctrica de la unidad de volumen del hormigón. Es la inversa de la conductividad y se obtiene de la relación entre la diferencia de potencial y la intensidad de corriente circulante referida a una geometría normalizada (cubo de 1 m de arista).

### **Constante de celda ( $k$ ):**

Relación entre la resistividad y la resistencia eléctrica. Se obtiene a través de la ley de Ohm como el cociente entre el área de la sección y la altura (distancia entre las bases) de la probeta de hormigón.

### **Constante de forma ( $\gamma$ ):**

La constante de forma es la relación entre la resistividad eléctrica obtenida mediante el método directo y la obtenida mediante el método de las cuatro puntas (Wenner). Es variable con las dimensiones de la probeta (altura y diámetro). En el caso de probetas cilíndricas de diámetro 15 cm y altura 30 cm, se considera igual a 1,65.

#### **4.5.1. Método directo.**

El método directo se ha realizado según lo establecido en la norma **UNE 83988-1**<sup>[32]</sup>, la cual se describe a continuación.

##### Fundamento:

Consiste en la medida de la resistencia eléctrica del hormigón endurecido al aplicar un campo eléctrico uniforme mediante dos electrodos en contacto con las bases de la probeta. Este método será considerado como el método de referencia para la medida de la resistividad de probetas y testigos de hormigón.

##### Material y equipos:

- **Medidor de resistencia eléctrica (Resistivímetro):** Es un aparato capaz de aplicar una tensión o intensidad de corriente estable sobre la probeta a ensayar y a la vez medir, respectivamente, la intensidad y el potencial. Se recomienda que se aplique una frecuencia inferior a los 500 Hz con una fuente de corriente alterna tal que haga que circulen entre 30 mA y 50 mA para el caso de probeta cilíndrica.

Se podrá usar menos corriente si el salto de potencial es el adecuado para la medida. También se podrá emplear una fuente de corriente alterna y dos multímetros externos para la determinación de la intensidad  $I$  y la tensión  $V$ . Los valores anteriores son sólo orientativos.

En este estudio se ha optado por la fuente de corriente alterna y los multímetros para tomar las medidas.

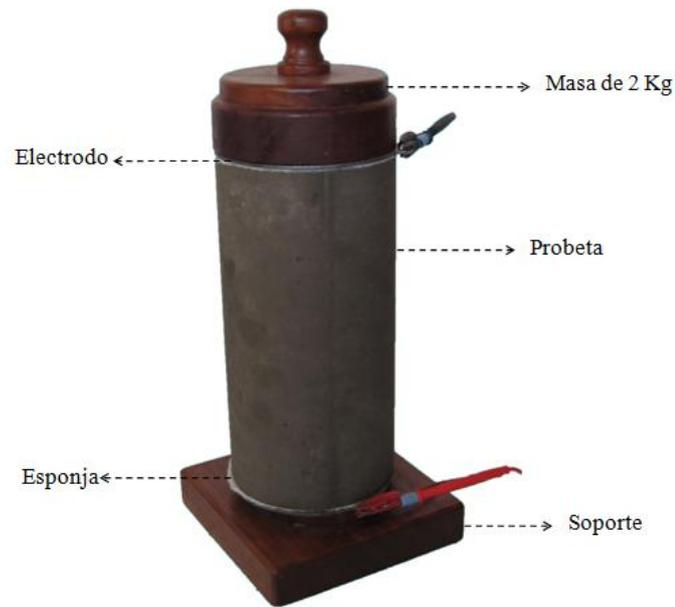
**- Material complementario:**

**Electrodos:** Se utilizarán como electrodos dos chapas de acero, cobre o cualquier otro metal conductor libre de impurezas superficiales (depósitos, óxidos visibles, suciedad, etc.) y de dimensiones iguales a las de la sección transversal de la probeta o testigo, con el fin de que ni sobresalgan ni sean más pequeñas que el tamaño de las caras de la muestra en las que se sitúen.

**Esponjas de contacto:** Dos esponjas finas (de espesor  $\leq 5$  mm) de iguales dimensiones que los electrodos, que deberán ser colocadas entre las chapas y las caras paralelas de la probeta. Serán humedecidas antes de realizar el ensayo.

**Masa de aproximadamente 2 kg:** Cualquier objeto de al menos una cara plana de dimensiones similares a las de la probeta o testigo y de material no conductor para presionar el electrodo superior contra la esponja de contacto y el hormigón.

Para este ensayo se la utilizado el equipo diseñado y fabricado por el laboratorio de Química y Materiales de la Escuela Superior Politécnica de Ingeniería, en la sección de Arquitectura Técnica de la Universidad de La Laguna, que consiste en un soporte de madera, con las dimensiones exactas para una probeta de 30x15 centímetros, dos electrodos, formados por chapas de acero, con las mismas dimensiones de la base, unas esponjas de contacto que para que fuera un elemento conductor y no causara ningún perjuicio al ensayo se diseñaron de paño, con las mismas dimensiones que los electrodos, y para finalizar, la masa de 2 Kg de peso, la cual está formada por el peso y envuelta en madera de forma que sea fácilmente manejable. Véase la siguiente figura.



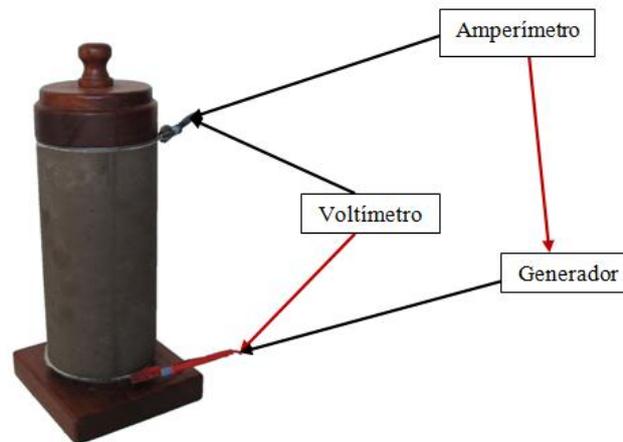
*Fig. 4.9. Equipo de medición de la resistividad por el método directo.*

Muestra para el ensayo:

El ensayo se debe realizar con las probetas de hormigón endurecido completamente saturadas de agua. Estas condiciones se alcanzan con probetas de ensayo recién fabricadas mediante el curado de las mismas durante 28 días sumergidas en agua. La temperatura del agua de la balsa debe ser de  $(20 \pm 2)$  °C. Es importante tener especial cuidado en evitar la evaporación de la cara superior de la probeta de ensayo durante las primeras 24 horas desde su fabricación, cuando permanece dentro del molde. Para evitar esta evaporación se puede, por ejemplo, cubrirla con un plástico.

Procedimiento:

En primer lugar se conectará el dispositivo de medida tal y cómo indica la siguiente figura.



**Fig. 4.10.** Esquema de conexiones del dispositivo de medida.

Se conecta el voltímetro a cada uno de los electrodos, para medir el voltaje, a continuación, se conecta uno de los electrodos directamente al amperímetro, el cual medirá la intensidad de corriente, y a su vez, el amperímetro se conecta a un generador de corriente que será conectado al restante electrodo, quedando un esquema como el que se ha mostrado en la figura anterior.

Las esponjas se humedecerán usando agua potable. Para medir la resistencia eléctrica de las esponjas, se introducen estas entre los electrodos y se coloca la masa de 2 kg sobre ellos.

Se aplica la corriente con el resistivímetro y se mide la diferencia de potencial una vez estabilizada la medida (normalmente al cabo de 5 s si se mide con corriente continua) obteniendo la resistencia de las esponjas solas,  $R_{sp}$ . La resistencia eléctrica de las esponjas no deberá exceder los 100  $\Omega$ .

Para conocer la resistividad eléctrica de las probetas, inmediatamente antes de someter la probeta al ensayo se seca cuidadosamente su superficie lateral con un paño ligeramente húmedo para retirar el agua sobrante. No se secarán las caras superior e inferior, donde se colocan las esponjas humedecidas y los electrodos, colocando sobre el superior la masa de unos 2 kg.

Se conectan ambos electrodos al resistivímetro y se mide la resistencia total del conjunto ( $R_{e+sp}$ ) cuando se estabilice la corriente. El número de determinaciones de la resistividad será de dos en cada probeta de ensayo o probeta testigo.

Cálculos y resultado:

La resistencia eléctrica según la ley de Ohm se calcula por medio de la siguiente relación:

$$R = \frac{V}{I} \quad (4.2)$$

donde,

$R$  es la resistencia eléctrica del hormigón, en  $\Omega$ ;

$I$  es la intensidad eléctrica que circula por el circuito, en A;

$V$  es la diferencia de potencial entre los electrodos, en V.

La resistencia eléctrica del hormigón se obtendrá a su vez de:

$$R_e = R_{e+sp} - R_{sp} \quad (4.3)$$

donde

$R_e$  es la resistencia eléctrica del hormigón;

$R_{e+sp}$  es la resistencia eléctrica del hormigón más la de las esponjas;

$R_{sp}$  es la resistencia eléctrica de las esponjas.

La constante de celda se calcula por medio de la siguiente relación:

$$k = \frac{S}{L} \quad (4.4)$$

donde

$S$  es el área de la cara de la probeta en la que se sitúa la esponja, en  $m^2$ ;

$L$  es la altura de las probetas, en m.

Una vez determinada la resistencia eléctrica de la probeta o testigo, y la constante de celda del método de ensayo, se calculará la resistividad eléctrica por medio de la siguiente expresión:

$$\rho_e = k R_e \quad (4.5)$$

donde

$\rho_e$  es la resistividad eléctrica, en  $\Omega \cdot m$ ;

$k$  es la constante de celda, en m;

$R_e$  es la resistencia eléctrica, en  $\Omega$ .

La resistividad eléctrica se expresará en  $\Omega \cdot m$  en números enteros y para cada probeta se expresará con el valor medio de las dos medidas realizadas.

#### **4.5.2. Método indirecto.**

El método directo se ha realizado según dicta la norma **UNE 83988-2**<sup>[33]</sup>, la cual se describe a continuación.

##### Fundamento:

Consiste en la determinación de la resistividad eléctrica del hormigón endurecido al aplicar una corriente entre dos electrodos situados en una generatriz de la probeta, y medir el voltaje en otros dos electrodos situados entre los anteriores y alineados con ellos. El método proporciona la resistencia eléctrica del hormigón  $R_e$ . Conociendo el espaciado de los electrodos y las dimensiones de la muestra se calcula la constante de celda  $k$  y la resistividad eléctrica  $\rho_e$ , según se describe en el apartado de procedimiento de ensayo.

##### Material y equipos:

De la misma manera que en la medición de la resistividad por el método directo, para este ensayo se ha utilizado el equipo diseñado y fabricado por el laboratorio de Química y Materiales de la Escuela Superior Politécnica de Ingeniería, en la sección de Arquitectura Técnica de la Universidad de La Laguna, que consisten en:

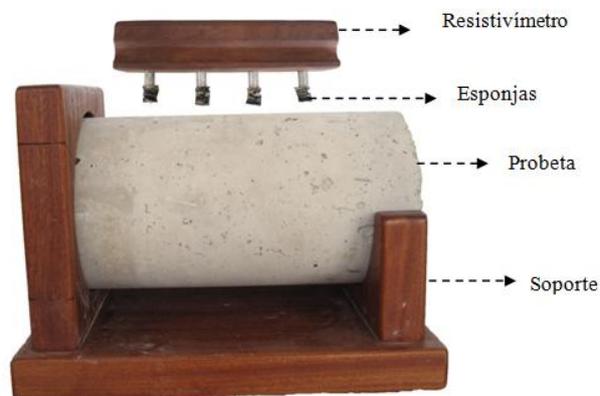
**-Medidor de resistencia eléctrica de cuatro puntas tipo Wenner (Resistivímetro):**

Es un aparato capaz de aplicar una corriente estable. Se recomienda que ésta sea alterna de hasta 40 mA a una frecuencia inferior a los 500 Hz. También se podrá emplear una fuente de corriente alterna o continua y dos multímetros para la determinación de la intensidad  $I$  y la tensión aplicada  $V$ . Se podrá utilizar un registrador para la realización de varias medidas al mismo tiempo. Los valores anteriores son solo orientativos.

**- Material complementario**

**Electrodos:** Cuatro electrodos, puntas, fabricados de cobre o de otro metal conductor libre de impurezas superficiales (depósitos, óxidos visibles, suciedad, etc.) cuyo diámetro esté comprendido entre 4 mm y 6 mm, que deberán estar acoplados en un soporte rígido de modo que su separación sea de 5 cm.

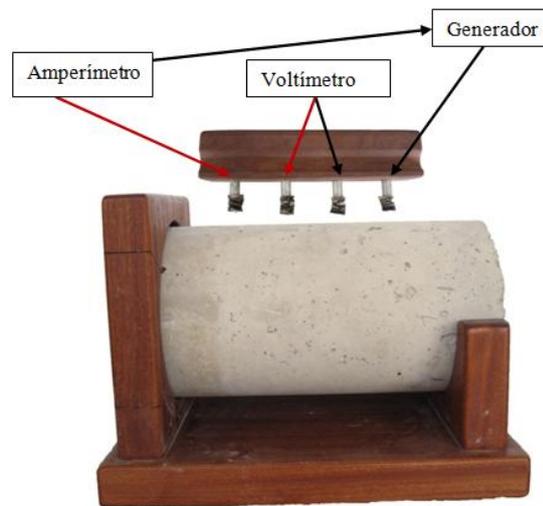
**Esponjas de contacto:** Cuatro esponjas individuales en la punta de los electrodos, que se humedecerán con agua potable para garantizar el contacto hormigón-electrodo.



*Fig. 4.11. Equipo de medición de la resistividad por el método indirecto.*

Procedimiento:

En primer lugar se conectará el dispositivo de medida tal y cómo indica la siguiente figura, habiendo humedecido las esponjas con agua potable.



**Fig. 4.21.** Esquema de conexiones del equipo de medida.

Inmediatamente antes de someter la probeta al ensayo, se secará cuidadosamente su superficie lateral con un paño ligeramente húmedo para retirar el agua sobrante.

A continuación se apoyará una generatriz de la probeta sobre un soporte no conductor y se colocarán las 4 puntas centradas respecto de las caras laterales, según se muestra en la figura anterior.

Cuando se establezca la corriente se realizarán seis medidas sobre seis generatrices separadas  $60^\circ$  entre sí, alrededor de la muestra, para medir a lo largo de todo el perímetro de forma homogéneamente espaciada. El valor de la resistencia eléctrica de cada probeta será la media de estas seis medidas.

#### Cálculos y resultado:

La resistencia eléctrica, según la ley de Ohm, se calcula por medio de la siguiente relación:

$$R = \frac{V}{I} \quad (4.6)$$

donde

$R$  es la resistencia eléctrica del hormigón, en  $\Omega$ ;

$I$  es la intensidad eléctrica que circula por el circuito, en A;

$V$  es la diferencia de potencial entre los electrodos centrales, antes y después de aplicar la corriente, en V.

La constante de celda, para el caso de probetas cilíndricas de diámetro 15 cm y altura 30 cm, se calcula por medio de la siguiente relación:

$$k = \frac{2\pi a}{\chi} \quad (4.7)$$

donde

$a$  es la distancia entre electrodos (5 cm);

$\chi$  es la constante de forma. Se considera de valor 1,65 en el caso de muestras cilíndricas de diámetro 15 cm y altura 30 cm.

Para otras configuraciones de tamaño de muestra, se deberá determinar la constante de forma  $\chi$ , mediante su calibración con el método directo.

Una vez determinada la resistencia eléctrica de la muestra y la constante de celda del método de ensayo, se calculará la resistividad eléctrica mediante:

$$\rho_e = k R_e \quad (4.8)$$

donde

$\rho_e$  es la resistividad eléctrica, en  $\Omega \cdot m$ ;

$k$  es la constante de celda, en m;

$R_e$  es la resistencia eléctrica, en  $\Omega$ .

La resistividad eléctrica se expresará en  $\Omega \cdot m$  en números enteros y para cada probeta se expresará con el valor medio de las seis medidas realizadas.

#### 4.6. Ensayo de velocidad de propagación de impulsos ultrasónicos.

La medida de la velocidad del impulso ultrasónico se ha realizado según lo dispuesto en la norma **UNE-EN 12504-4**<sup>[29]</sup>. Esta medida es utilizada para conocer la uniformidad del hormigón, la presencia de fisuras o coqueas, cambios de propiedades en el tiempo y determinación de propiedades dinámicas físicas. También es posible estimar la resistencia del hormigón, pero no debe tomarse como una alternativa a la determinación directa de la resistencia a compresión.

Con el objeto de conocer la evolución de las mezclas de este estudio y de los procesos de hidratación, se han tomado medidas de la velocidad de impulsos ultrasónicos a todas las probetas tras desmoldarlas, a la edad de siete días y a los veintiocho días de edad.

##### Fundamento:

Un palpador electroacústico mantenido en contacto con la superficie del hormigón en ensayo emite impulsos de vibraciones longitudinales. Después de atravesar en el hormigón una trayectoria de longitud conocida, el impulso de vibraciones se convierte en una señal eléctrica por un segundo palpador, mientras que circuitos electrónicos de temporización miden el tiempo de tránsito del impulso.

##### Material y equipos:

El aparato consiste en un generador de impulsos eléctricos, un par de palpadores, un amplificador y un temporizador electrónico para la medida del intervalo de tiempo transcurrido entre el comienzo de la onda del impulso generado en el palpador transmisor y el comienzo de la onda a su llegada al palpador receptor.



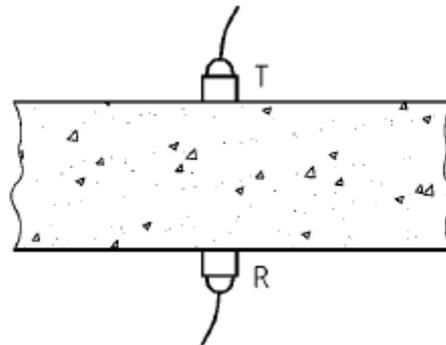
*Fig. 4.13. Equipo de medición de ultrasonidos.*

Entre el hormigón y la cara de cada palpador debe haber un adecuado acoplamiento acústico. Para asegurar un buen contacto acústico puede ser necesario usar un medio de acoplamiento tal como vaselina, grasa, jabón líquido y pasta de caolín y glicerina.

Procedimiento:

Cuando la superficie del hormigón es muy rugosa y desigual, la zona debería alisarse y nivelarse por pulido o mediante una resina epoxi de endurecimiento rápido.

Una vez colocada la pasta de contacto, se presiona el palpador contra la superficie de hormigón, colocando los palpadores enfrentados tal y como se muestra en la figura siguiente.



**Fig. 4.14.** Colocación de los palpadores. [UNE-EN 12504-4:2006]

En este estudio, al realizar el ensayo que nos ocupa en probetas cilíndricas de 300 mm de longitud, los palpadores se han colocado en el centro de las caras superior e inferior de las probetas.

En transmisión directa, la longitud de la trayectoria es la distancia más corta entre los palpadores. La precisión de la medida de la longitud de la trayectoria debe registrarse con una exactitud del  $\pm 1\%$ . Deben realizarse lecturas repetidas del tiempo de recorrido hasta obtener un valor mínimo, lo que indica que el espesor del elemento de acoplamiento se ha reducido al mínimo.

Resultado:

En transmisiones directas la velocidad del impulso se debe calcular mediante la fórmula:

$$V \text{ (km/s)} = \frac{\text{Longitud tramo (mm)}}{\text{Tiempo de recorrido (\mu s)}} \quad (4.9)$$

La determinación resultante de la velocidad del impulso se debe expresar con una aproximación de 0,01 km/s.

A partir del valor de la velocidad de los impulsos ultrasónicos es posible estimar un valor de la resistencia a compresión de las probetas ensayadas.

Para ello es necesario obtener el módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ):

$$E_d = V^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (4.10)$$

Donde:  $V$  es la velocidad calculada de los impulsos ultrasónicos,  $\rho$  es la densidad del hormigón y  $\nu$  el coeficiente de Poisson. Pudiendo estimarse el coeficiente de Poisson en 0,20 o bien dado que su valor puede oscilar dependiendo de la calidad del hormigón, entre 0,17 y 0,30.

En este estudio se realizaron los cálculos para los tres valores del coeficiente de Poisson, con lo que se obtuvieron distintos valores que servirán para el análisis de datos.

Salvo que se trate de un hormigón determinado, es muy difícil establecer una relación entre velocidad de propagación y resistencias. Lo que sí es fácil es determinar el módulo de elasticidad dinámico del hormigón y luego relacionarlo con la resistencia a compresión o flexotracción. Según indica Fernández Cánovas en su libro "Patología y terapéutica del hormigón armado"<sup>[8]</sup>, para hormigones normales con módulos de elasticidad dinámico comprendidos entre 200000 y 470000 kp/cm<sup>2</sup>, para determinar la resistencia a compresión puede utilizarse la fórmula:

$$f_c = 3,5 \cdot 10^{-9} \cdot E_d^2 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot E_d + 200 \quad (4.11)$$

En la que todos los valores están expresados en kp/cm<sup>2</sup>

Dadas las muchas variables que intervienen en la resistencia del hormigón y que afectan a la velocidad de propagación, algunos autores proponen que ésta sea un índice de calidad del mismo, como se puede ver en la siguiente tabla:

Velocidad de propagación lineal (m/s)	Calidad del hormigón
>4500	Excelente
3600 a 4500	Buena
3000 a 3600	Aceptable
2100 a 3000	Mala
< 2100	Muy mala

*Tabla 4.12. Calidad del hormigón según la velocidad de propagación. [Fernández Cánovas<sup>[8]</sup>].*

#### **4.7. Ensayo de resistencia a compresión.**

Mediante el ensayo de determinación de la resistencia a compresión de probetas, que dicta la norma **UNE-EN 12390-3**<sup>[25]</sup>, se comprueba si las mezclas realizadas llegan a la resistencia a compresión que interesan para este estudio. A continuación se describe la norma utilizada.

##### Fundamento:

Las probetas se comprimen hasta rotura en una máquina de ensayo de compresión. Se registra la máxima carga alcanzada por la probeta y se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

##### Material y equipos:

- **Máquina de ensayo a compresión**, conforme a la norma EN 12390-4<sup>[26]</sup>.



*Fig. 4.15. Máquina de ensayo a compresión.*

Muestra para el ensayo:

Las probetas deben ser cúbicas, cilíndricas o testigos que cumplan las especificaciones de las normas EN 12350-1<sup>[21]</sup>, EN 12390-1<sup>[23]</sup>, EN 12390-2<sup>[24]</sup>, o EN 12504-1<sup>[29]</sup>.

Las superficies destinadas a cargarse, deben ser preparadas por pulido o por refrentado. En el presente estudio se ha optado por el método de refrentado con azufre.

Procedimiento:

-Refrentado con mortero de azufre: Antes de refrentar, la superficie de la probeta debe estar seca, limpia y deben retirarse toda clase de partículas sueltas. El refrentado debe ser tan fino como sea posible y no debe tener más de 5 mm de grosor, aunque pueden permitirse pequeñas desviaciones locales. Pueden aceptarse mezclas comercializadas de azufre para refrentar que sean adecuadas. Alternativamente, el material de refrentado puede consistir de una mezcla compuesta en partes iguales en peso de azufre y arena silíceo fina (la mayor parte que pase por el tamiz de 250  $\mu\text{m}$  y que sea retenida por el tamiz de 125  $\mu\text{m}$ ). Puede añadirse una pequeña proporción de negro de humo, de hasta el 2%.

La mezcla debe calentarse a la temperatura recomendada por el suministrador o a una temperatura tal, que mientras se remueve continuamente, se alcance la consistencia requerida. La mezcla se remueve continuamente para asegurar su homogeneidad y para impedir que se formen sedimentos en el fondo del recipiente. Si las operaciones de refrentado se llevan a cabo repetidamente, es aconsejable usar dos recipientes para fundir controlados termostáticamente. El nivel de mezcla en el recipiente de fundir no debe dejarse demasiado bajo, pues con ello se incrementa la producción de vapores sulfurosos y el peligro de ignición.



*Fig. 4.16. Equipo de refrentado.*

Un sistema extractor de humos debe funcionar durante todo el proceso de fundido del azufre para asegurar la completa extracción de los vapores de azufre, que son más pesados que el aire. Se ha de tener cuidado de que la temperatura de la mezcla se mantenga entre los límites especificados para reducir los riesgos de polución.

Se baja un extremo de la probeta, mantenida verticalmente, hasta apoyar en el plato horizontal que contenga la mezcla de azufre fundida. Se deja que la mezcla se endurezca antes de repetir el procedimiento con el otro extremo. Se utiliza un equipo de refrentado que asegure que las dos caras refrentadas estén paralelas y se utiliza aceite mineral como desmoldante de los platos (puede ser necesario recortar el material de refrentado sobrante de los bordes de la probeta).



*Fig. 4.17. Proceso de refrentado.*

Se debe inspeccionar la probeta para asegurarse de que el material de refrentado se ha adherido perfectamente a ambas caras de la misma. Si la capa de refrentado suena a hueco, debe eliminarse y refrentarse de nuevo.

El ensayo de compresión no debe efectuarse hasta que hayan transcurrido al menos 30 minutos desde la operación de refrentado.



*Fig. 4.18. Probeta refrentada.*

-Preparación y posicionamiento de las probetas: Se seca el exceso de humedad de la superficie de la probeta antes de ponerla en la máquina de ensayos. Se secan los platos de carga de la máquina, debiendo eliminarse cualquier resto de gravilla u otro material extraño de las superficies de la probeta que han de estar en contacto con los platos.

Las probetas deben centrarse respecto al plato inferior con una aproximación de  $\pm 1\%$  de la dimensión normalizada del lado de la probeta cúbica o del diámetro de la probeta cilíndrica.

-Carga: Se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango de 0,2 MPa/s (N/mm<sup>2</sup>·s) a 1,0 MPa/s (N/mm<sup>2</sup>·s). Se aplica la carga a la probeta sin choques y se incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada  $\pm 10\%$ , hasta que no se pueda soportar más carga. Se registra la carga máxima indicada.



*Fig. 4.19. Ejemplo de carga máxima registrada en la amasada 4.*

#### Resultado:

Para las probetas cilíndricas, la rotura del refrentado antes de la rotura del hormigón es una rotura no satisfactoria.

En las siguientes figuras se dan ejemplos de rotura de probetas mostrando que los ensayos se han realizado satisfactoriamente y ejemplos de roturas no satisfactorias. Si la forma de la rotura no es satisfactoria debe hacerse constar con referencia al tipo de rotura más parecido.

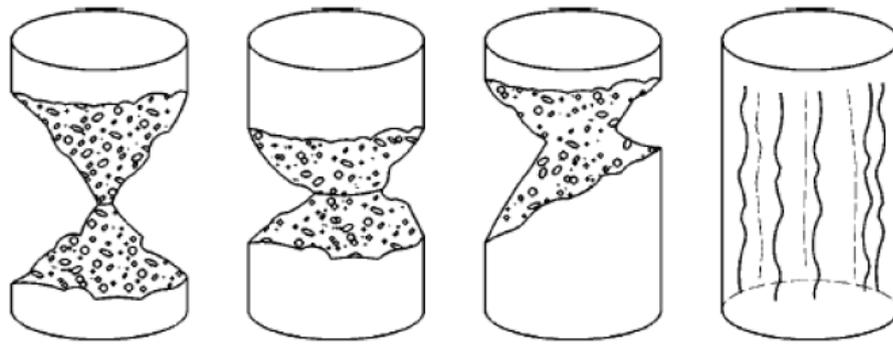


Fig. 4.20. Roturas satisfactorias [UNE-EN 12390-3]

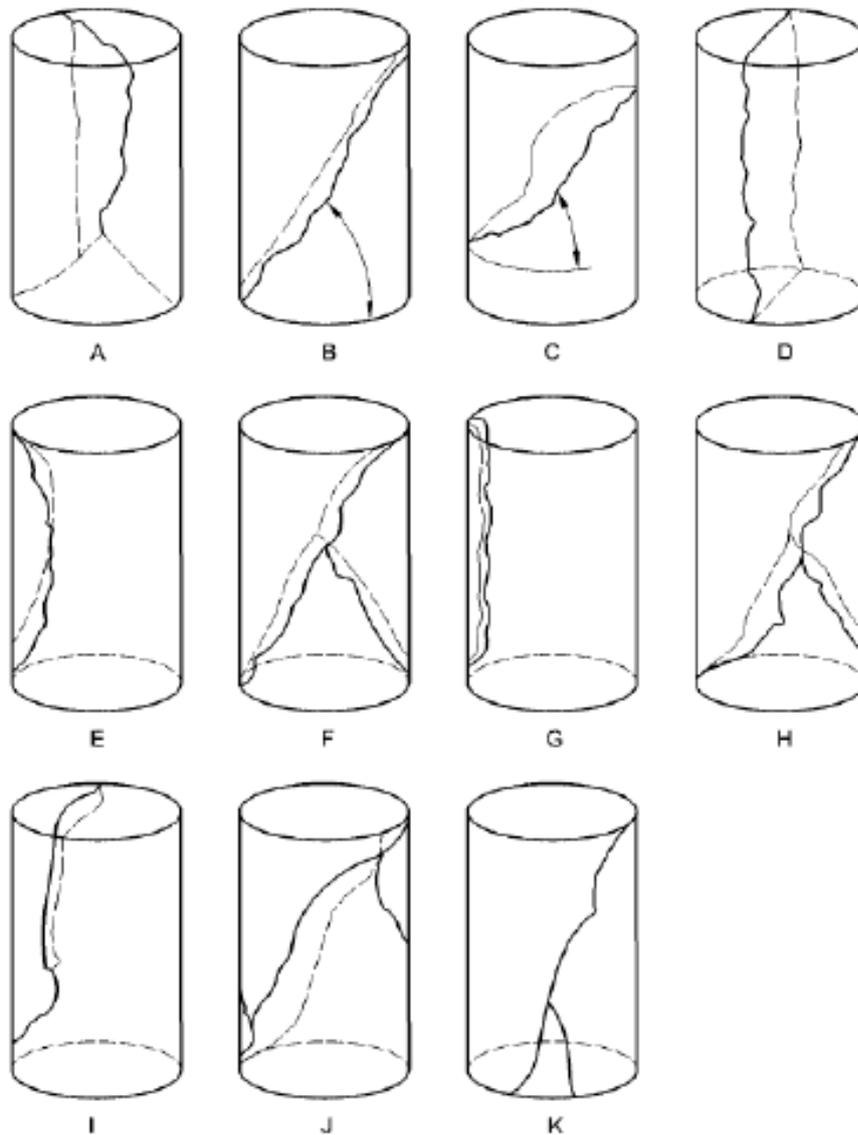


Fig. 4.21. Roturas no satisfactorias [UNE-EN 12390-3]

La resistencia a compresión viene dada por la ecuación:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.12)$$

donde, “ $f_c$ ” es la resistencia a compresión, en megapascales (newtons por milímetro cuadrado); “ $F$ ” es la carga máxima en rotura, en newtons; y “ $A_c$ ” es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión.

La resistencia a compresión debe expresarse redondeándolas al 0,5 MPa (N/mm<sup>2</sup>) más cercano.

Según se indica en el “art. 86.3 Realización de Ensayos”, en general, la comprobación de las especificaciones incluidas en la EHE-08<sup>[5]</sup> para el hormigón endurecido, se llevará a cabo mediante ensayos realizados a la edad de 28 días.

#### **4.8. Ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión.**

Para comprobar la impermeabilidad de la mezcla se ha realizado el ensayo de profundidad de penetración, colocando la probeta en agua a presión según la norma **UNE-EN 12390-8**<sup>[28]</sup>.

##### Fundamento:

Este método se emplea para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión en hormigones endurecidos que han sido curados en agua. El agua es aplicada bajo presión a la superficie del hormigón endurecido. A continuación se divide la probeta por rotura en dos mitades y se mide la profundidad de penetración del frente de agua.

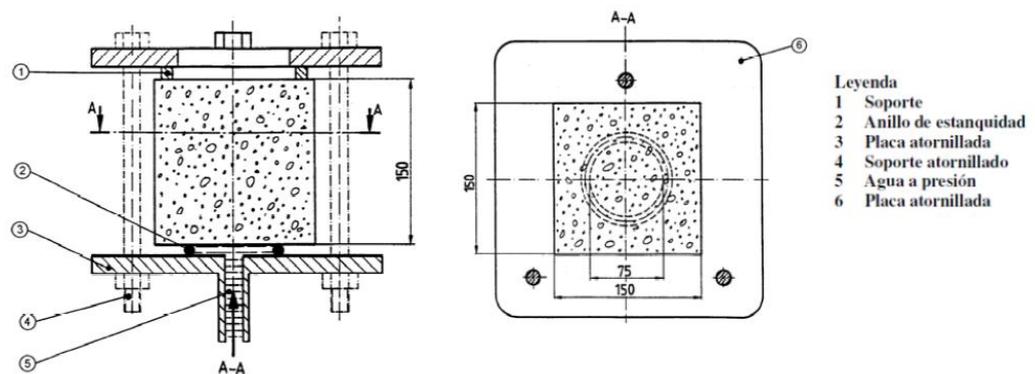
##### Material y equipos:

La norma establece que el equipo consistirá en cualquier equipo en el que la probeta de ensayo, de dimensiones dadas, se pueda situar de tal manera que la presión del actúe sobre la zona de ensayo y se visualice la presión aplicada de forma continua. El dispositivo utilizado es que se muestra en la siguiente imagen.



*Fig. 4.22. Equipo de agua a presión.*

Se debe realizar un sellado suficiente con caucho u otro material similar. Las dimensiones de la zona de ensayo serán aproximadamente la mitad de la longitud del lado o del diámetro de la superficie de la cara de la probeta.



*Fig. 4.23. Ejemplo de dispositivo de ensayo. Cotas en milímetros [UNE-EN 12390-8<sup>[28]</sup>].*

Procedimiento:

El ensayo debe comenzar cuando las probetas tengan al menos una edad de 28 días. En este estudio se ha comenzado el ensayo cuando las muestras tenían la edad de 40 días. La probeta se coloca en el aparato de ensayo y se aplica al agua una presión de  $(500 \pm 50)$  kPa

durante  $(72 \pm 2)$  h. Las probetas se han colocado con la cara fratasada recibiendo el agua a presión.

Resultado:

Después de aplicar la presión durante el tiempo especificado, se retira la probeta del dispositivo de ensayo y se limpia la cara a la que se aplicó la presión de agua para retirar el exceso de agua. Se rompe la probeta en dos mitades, perpendicularmente a la cara en la que se aplica la presión de agua. Para ello se ha realizado la rotura mediante el ensayo de la resistencia a flexo-tracción.

Cuando se rompa la probeta, y durante el examen, la cara de la probeta expuesta a la presión de agua se situará en el fondo. Tan pronto como la cara partida se ha secado de forma tal que se puede ver claramente la extensión del frente de penetración de agua, se marca en la probeta dicho frente de penetración. Se mide la profundidad máxima de penetración bajo la superficie de ensayo y se redondea al milímetro más próximo.



*Fig. 4.24. Ejemplo de frente de penetración.*

La EHE-08<sup>[5]</sup> establece en su artículo 37.3.3 “Impermeabilidad del hormigón” que un hormigón se considera suficientemente impermeable al agua si los resultados del ensayo de penetración de agua cumplen simultáneamente que:

Clase de exposición ambiental	Especificación para la profundidad máxima	Especificación para la profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIc, Qc Qb (sólo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

**Tabla 4.13.** Impermeabilidad del hormigón [art. 37.3.3 EHE-08<sup>[5]</sup>]

Para calcular la profundidad de penetración de agua en la probeta, la norma recomienda un método para calcular el área del frente de penetración y a partir de ahí la profundidad de penetración, sin embargo, y al ser sólo una recomendación, en este estudio se ha obtenido el área del frente de penetración a partir de la curva de área mojada mediante el cálculo del área de los trapecios que conforman la curva.

A continuación, la profundidad de penetración en milímetros se obtiene dividiendo el área del frente de penetración por el diámetro de la probeta.

#### **4.9. Ensayo de resistencia a tracción indirecta de probetas.**

Para poder comprobar la penetración de agua en la probeta tras el ensayo de penetración de agua bajo presión, es necesario romper la probeta en dos, y para eso utilizamos el ensayo Brasileño que nos permite también conocer la resistencia a tracción indirecta de las probetas. Para ello se tiene en cuenta lo establecido en la norma **UNE-EN 12390-6<sup>[27]</sup>**.

##### Fundamento:

Una probeta cilíndrica se somete a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha y en toda su longitud. El resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante origina que la probeta rompa a tracción.

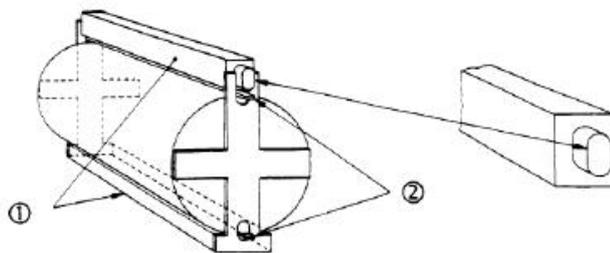
##### Material y equipos:

Máquina de ensayo y dispositivo (opcional), para alinear las probetas y las bandas de apoyo. El dispositivo no impedirá la deformación de la probeta durante el ensayo.

Para este estudio se ha utilizado la misma máquina que para el ensayo de resistencia a compresión, de la cual dispone el laboratorio de materiales de la Escuela de Ingeniería de Edificación de la Universidad de La Laguna, con la diferencia de que en este caso se utiliza además un dispositivo para que la probeta rompa a tracción.



*Fig. 4.25. Máquina de ensayo.*

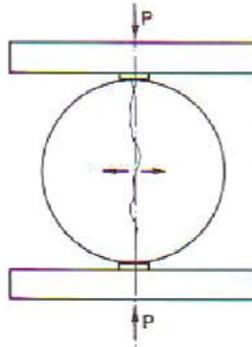


*Fig. 4.26. Dispositivo de ensayo para probetas cilíndricas (UNE-EN 12390-6<sup>[27]</sup>) Leyenda. 1: Pieza de acero de carga. 2: Bandas de apoyo*

#### Procedimiento:

El exceso de humedad, en las probetas curadas en agua, se eliminará de la superficie de las probetas, antes de su colocación en la máquina de ensayo. La probeta se coloca centrada en la prensa, si se desea utilizando el dispositivo opcional. Se sitúan con cuidado las bandas de apoyo y, si fuera necesario, las piezas de carga, a lo largo de la parte superior e inferior del plano de carga de la probeta.

Se selecciona un incremento de tensión constante dentro del rango de 0,04 MPa/s (N/mm<sup>2</sup>·s) a 0,06 MPa/s (N/mm<sup>2</sup>·s). La carga se aplica sin brusquedades y se incrementa continuamente, en la velocidad seleccionada  $\pm 10\%$ , hasta que no soporte una carga mayor.



**Fig. 4.27.** Ensayo de tracción (método brasileño) [Fernández Cánovas<sup>[7]</sup>].

#### Resultado:

Una vez finalizado el ensayo se debe examinar la rotura de la probeta y el aspecto del hormigón y anotar cualquier anomalía. La resistencia a tracción indirecta viene dada por la fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (4.13)$$

donde:

- $f_{ct}$  es la resistencia a tracción indirecta, en megapascales o newtons por milímetro cuadrado;
- $F$  es la carga máxima, en newtons;
- $L$  es la longitud de la línea de contacto de la probeta, en milímetros;
- $d$  es la dimensión de la sección transversal, en milímetros.

La resistencia a tracción se expresa con una aproximación de 0,05 MPa (N/mm<sup>2</sup>).



*Fig. 4.28. Ejemplo rotura a tracción indirecta.*

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS

## 5. Resultados.

A continuación se representan los resultados comparándolos viendo su variación con respecto al tiempo, según el ajuste de los áridos y su relación agua/cemento, de manera que se puedan interpretar los datos obtenidos.

Para diferenciar las amasadas según su granulometría, se llamará granulometría comercial a las amasadas 1 y 2, pues se realizaron con el árido compuesto. Las amasadas 3 y 4 se realizaron ajustando la granulometría a la curva de Bolomey y a las 5 y 6 nos referiremos como ajustadas por el Método de Empaquetamiento Compresible. La amasada número 7 se realizó con las mismas características que la 4, es decir con ajuste a Bolomey, pero cambiando el tipo de cemento utilizado. A continuación se detallan las características de cada amasada así como los resultados de los ensayos. En aquellos ensayos de los que hay datos de dos probetas, se ha colocado el valor medio.

Denominación	Comercial		Bolomey		MEC		Bolomey 52,5
Amasada	1	2	3	4	5	6	7
a/c efectiva	0,60	0,48	0,60	0,48	0,60	0,55	0,48
Tipo de Cemento	CEM IV/B (P) 32,5N						CEM I 52,5R
Dosificaciones							
Material	Peso para 3 probetas (Kg)						
Cemento	8,1	8,1	8,10	8,10	8,10	8,10	8,10
Húmo de sílice	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81
Agua	5,832	4,6656	5,83	4,67	5,83	5,40	4,67
Arena	25,02	25,02	6,56	7,17	12,53	14,04	7,17
Grava			18,70	20,43	12,53	14,04	20,43
Aditivo	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018

*Tabla. 5.1. Identificación de las amasadas.*

Denominación	Comercial		Bolomey		MEC		Bolomey 52,5
Amasada	1	2	3	4	5	6	7
a/c efectiva	0,60	0,48	0,60	0,48	0,60	0,55	0,48
Tipo de Cemento	CEM IV/B (P) 32,5N						CEM I 52,5R
Resultado de ensayos							
Asentamiento (cm)		18,5		2,3	19,5	5,5	6
Escurrimiento (cm)	53		43				
Imagen de la consistencia							
Densidad a 28 días(Kg/m <sup>3</sup> )	2236,37	2216,1	2258,35	2289,57	2222,6	2249,77	2312,96
Resistividad directo a 28 días (Ωm)	145,38	187,48	130,75	178,8	148,92	161,95	107,65
Resistividad indirecto a 28 días (Ωm)	137,9	161,47	128,8	175,33	140,88	160,57	98,04
Vel. Ultrasónicos a 28 días(m/s)	4018,77	4046,83	4252,41	4190,34	4013,38	4008,03	4322,91
Resist. Compresión a 28 días (Mpa)	23,0	30,5	27,0	35,5	29,0	33,0	58,0
Imagen de las roturas a compresión							
Prof. media de penetración(mm)	18,57	15,70	22,60	18,93	11,53	17,33	18,83
Imagen de las roturas a tracción indirecta							
Resist. Tracción indirecta a 40 días (MPa)	2,0	2,5	2,0	3,3	2,3	2,9	3,6

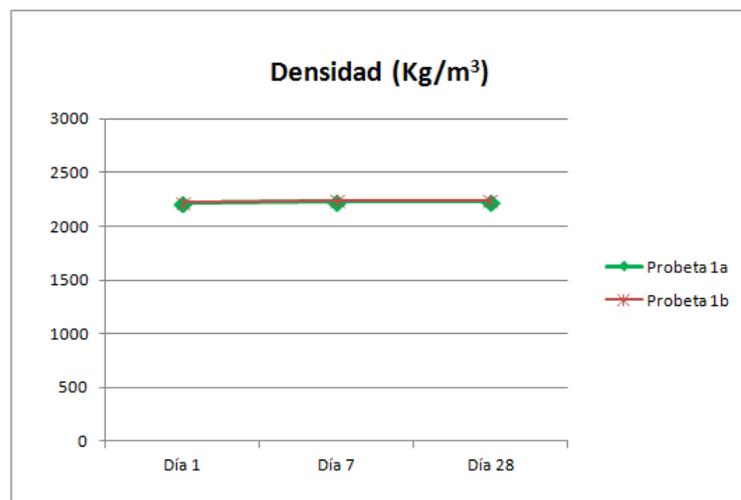
**Tabla. 5.2.** Tabla resumen de los resultados de los ensayos realizados.

### 5.1. Variación de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) y la resistividad ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) en el tiempo.

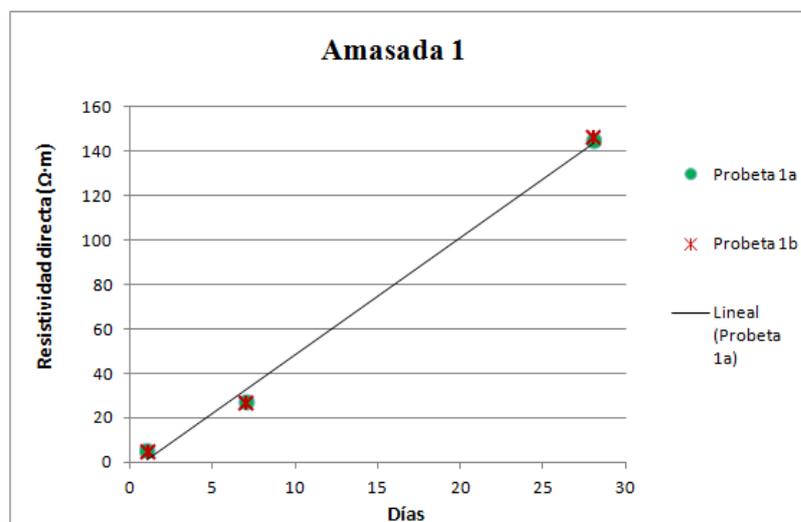
Amasada 1:

Día	Densidad ( $\text{Kg/m}^3$ )		Resistividad directa ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	
	Probeta 1a	Probeta 1b	Probeta 1a	Probeta 1b
Día 1	2216,6	2225,4	5,30	4,83
Día 7	2230,7	2240,1	27,00	27,03
Día 28	2231,8	2240,9	144,33	146,44

*Tabla. 5.3. Datos de densidad y resistividad de la amasada 1.*



*Fig. 5.1. Amasada 1, variación de la densidad con el tiempo.*

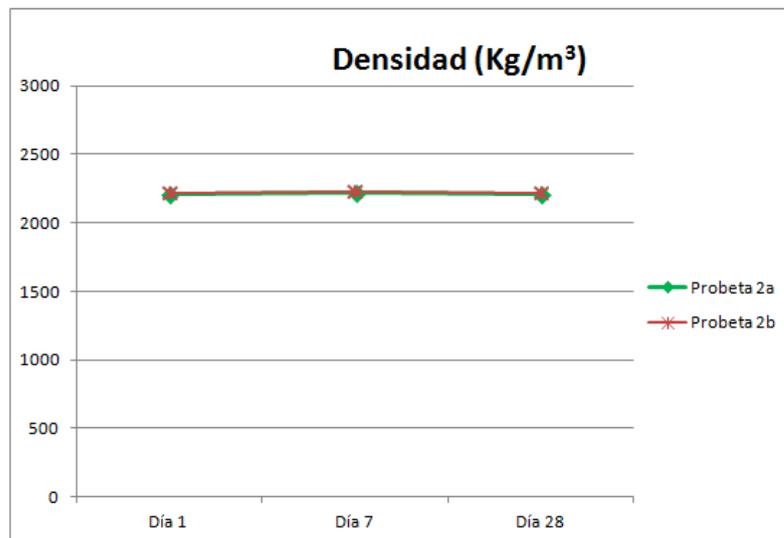


*Fig. 5.2. Amasada 1, variación de la resistividad con el tiempo.*

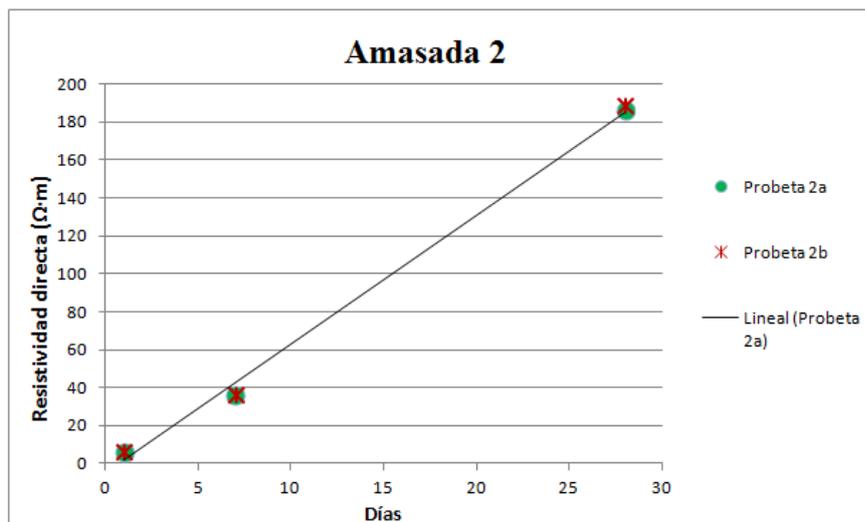
Amasada 2:

Día	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		Resistividad directa (Ω·m)	
	Probeta 2a	Probeta 2b	Probeta 2a	Probeta 2b
Día 1	2207,5	2219,8	6,34	5,77
Día 7	2220,9	2230,5	36,74	35,95
Día 28	2210,9	2221,3	186,54	188,42

**Tabla. 5.4.** Datos de densidad y resistividad de la amasada 2.



**Fig. 5.3.** Amasada 2, variación de la densidad con el tiempo.

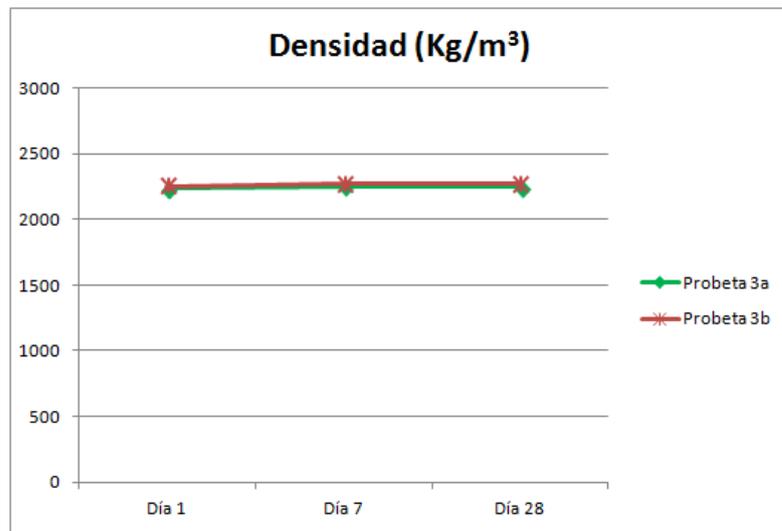


**Fig. 5.4.** Amasada 2, variación de la resistividad con el tiempo.

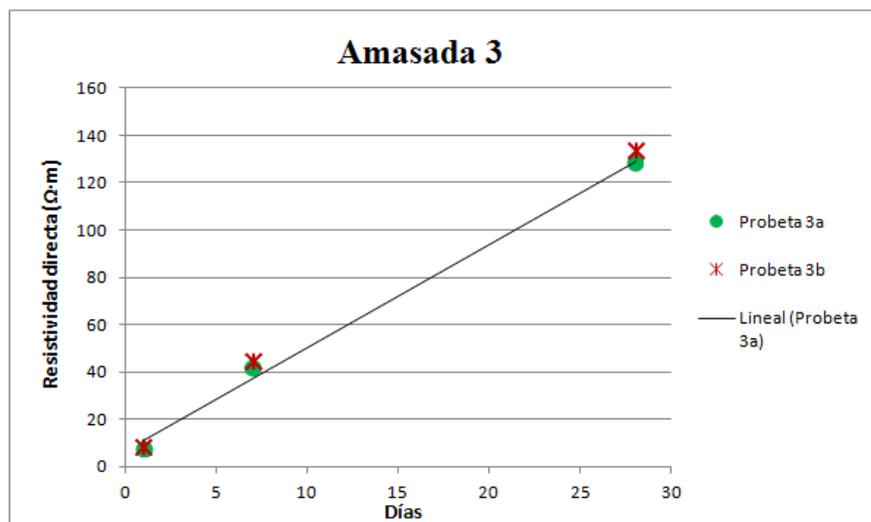
Amasada 3:

Día	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		Resistividad directa (Ω·m)	
	Probeta 3a	Probeta 3b	Probeta 3a	Probeta 3b
Día 1	2234,9	2254,9	7,63	7,94
Día 7	2247,5	2269,2	41,57	44,08
Día 28	2247,1	2269,6	128,16	133,34

*Tabla. 5.5. Datos de densidad y resistividad de la amasada 3.*



*Fig. 5.5. Amasada 3, variación de la densidad con el tiempo.*

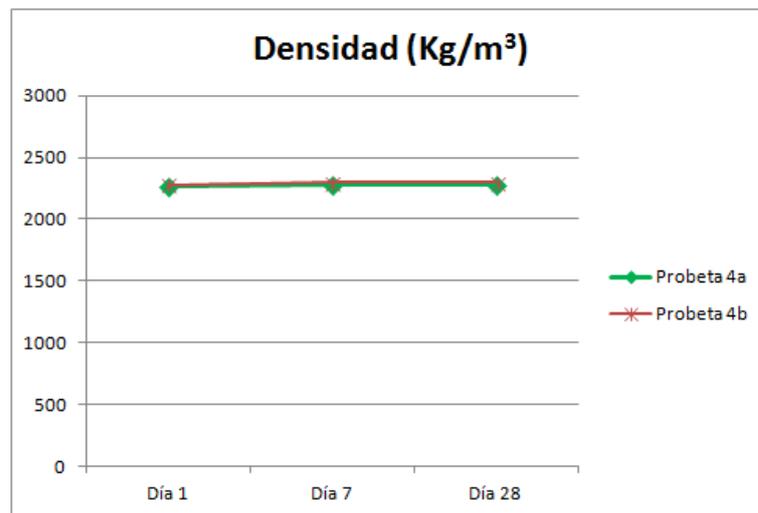


*Fig. 5.6. Amasada 3, variación de la resistividad d con el tiempo.*

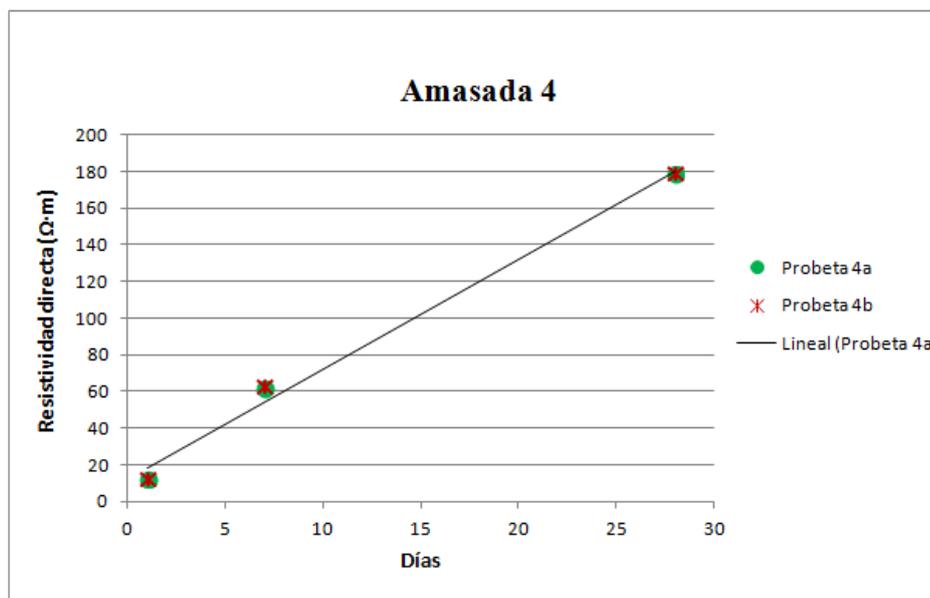
Amasada 4:

Día	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		Resistividad directa (Ω·m)	
	Probeta 4a	Probeta 4b	Probeta 4a	Probeta 4b
Día 1	2272,3	2280,7	12,64	12,82
Día 7	2285,5	2293,8	61,72	63,24
Día 28	2284,1	2295,0	178,64	178,95

**Tabla. 5.6.** Datos de densidad y resistividad de la amasada 4.



**Fig. 5.7.** Amasada 4, variación de la densidad con el tiempo.

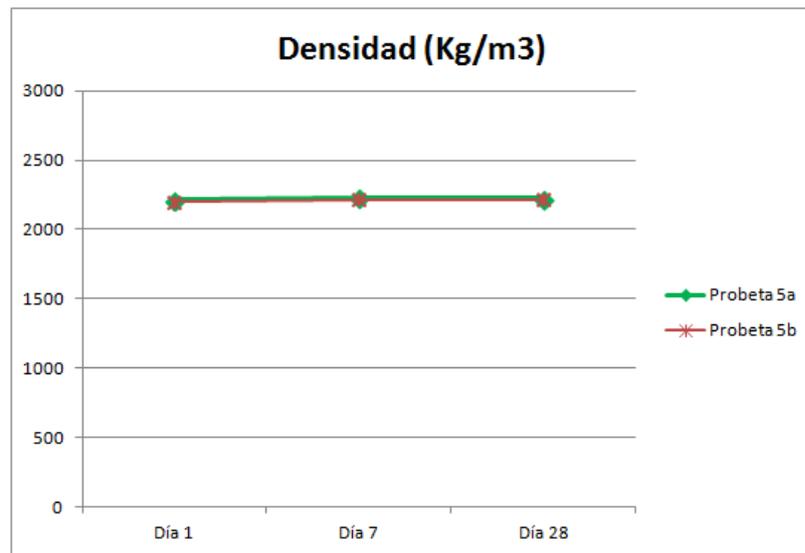


**Fig. 5.8.** Amasada 4, variación de la resistividad con el tiempo.

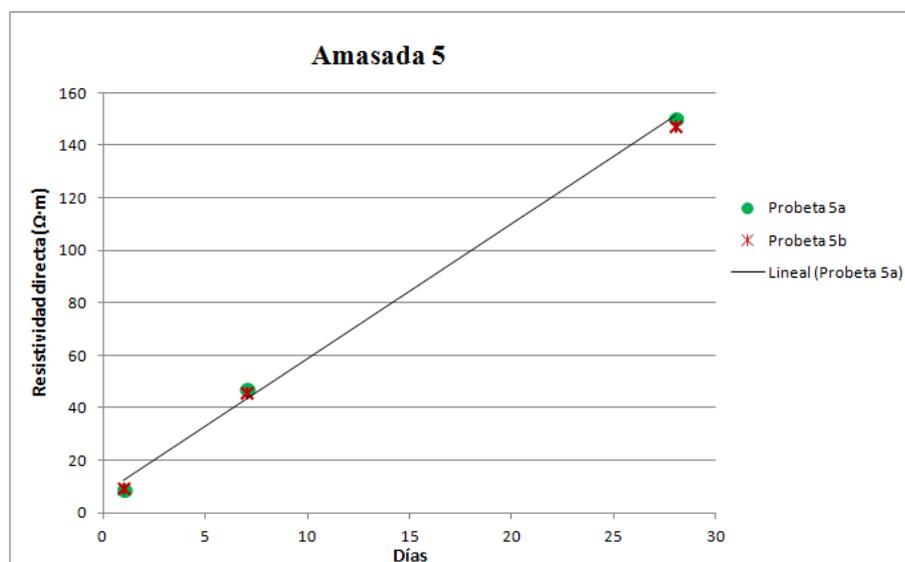
Amasada 5:

Día	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		Resistividad directa (Ω·m)	
	Probeta 5a	Probeta 5b	Probeta 5a	Probeta 5b
Día 1	2213,4	2202,0	8,74	8,64
Día 7	2228,1	2216,4	44,70	44,97
Día 28	2227,5	2217,7	140,55	141,22

*Tabla. 5.7. Datos de densidad y resistividad de la amasada 5.*



*Fig. 5.9. Amasada 5, variación de la densidad con el tiempo.*

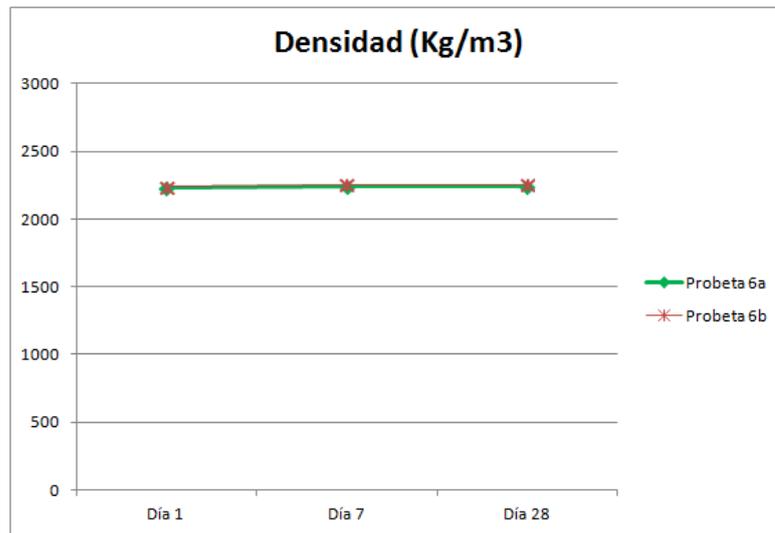


*Fig. 5.10. Amasada 5, variación de la resistividad con el tiempo.*

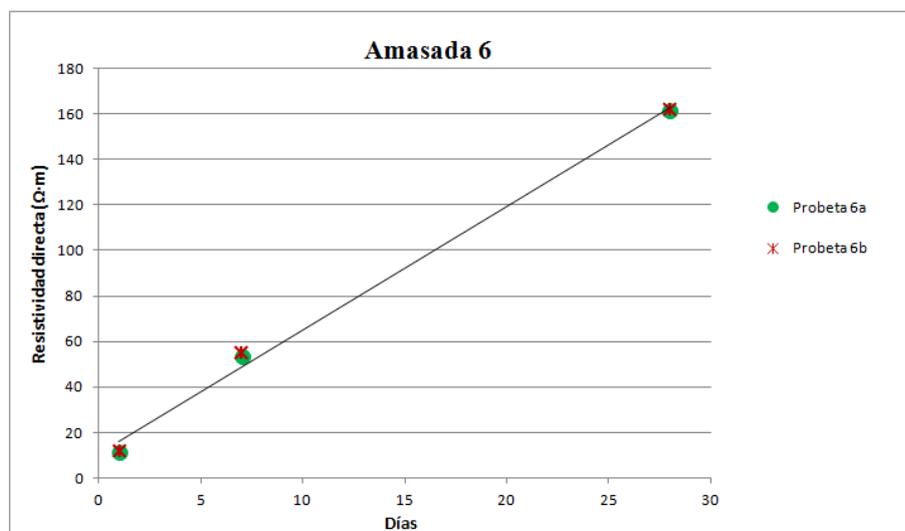
Amasada 6:

Día	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		Resistividad directa (Ω·m)	
	Probeta 6a	Probeta 6b	Probeta 6a	Probeta 6b
Día 1	2233,4	2237,9	11,72	12,34
Día 7	2246,9	2251,3	53,82	55,10
Día 28	2247,3	2252,2	161,58	162,32

**Tabla. 5.8.** Datos de densidad y resistividad de la amasada 6.



**Fig. 5.11.** Amasada 6, variación de la densidad con el tiempo.

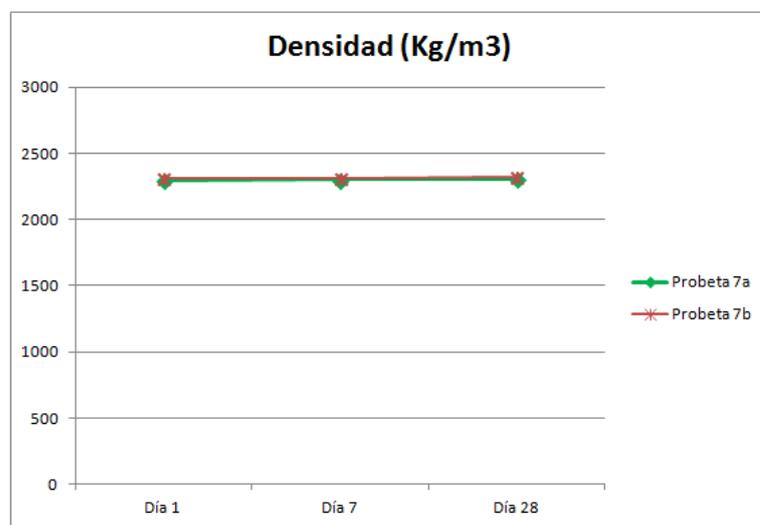


**Fig. 5.12.** Amasada 6, variación de la resistividad con el tiempo.

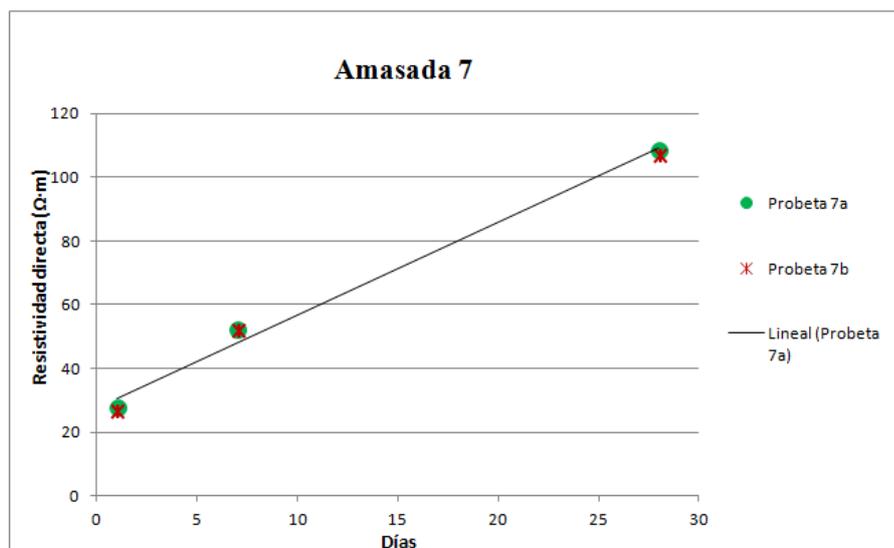
Amasada 7:

Día	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )		Resistividad directa (Ω·m)	
	Probeta 7a	Probeta 7b	Probeta 7a	Probeta 7b
Día 1	2300,3	2311,3	27,53	26,40
Día 7	2302,8	2312,8	52,14	51,70
Día 28	2308,1	2317,9	108,40	106,90

**Tabla. 5.9.** Datos de densidad y resistividad de la amasada 7.



**Fig. 5.13.** Amasada 7, variación de la densidad con el tiempo.

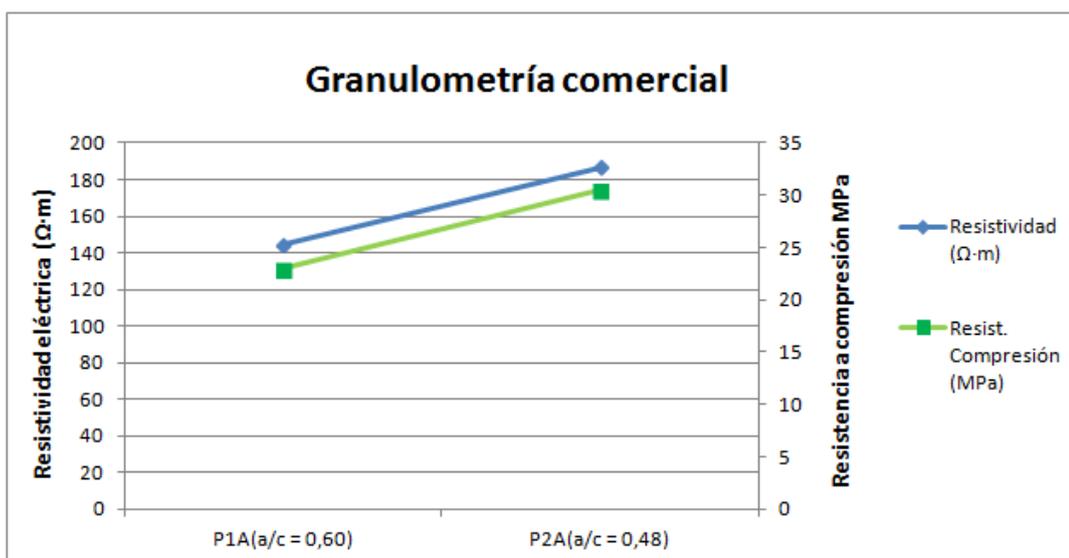


**Fig. 5.14.** Amasada 7, variación de la resistividad con el tiempo.

## 5.2. Comparación de la resistividad a los 28 días y la resistencia a compresión de las probetas según el ajuste granulométrico.

Granulometría comercial	Rel. a/c efectiva	
	0,60	0,48
Número de amasada	Amasada 1 (P1A)	Amasada 2 (P2A)
Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N	
Resistividad ( $\Omega\cdot m$ )	144,33	186,54
Resist. Compresión (MPa)	23,0	30,5

*Tabla. 5.10. Datos de resistividad y resistencia a compresión amasadas 1 y 2.*



*Fig. 5.15. Representación de la resistividad y la resistencia a compresión amasadas 1 y 2.*

Ajuste de Bolomey	Rel. a/c efectiva	
	0,60	0,48
Número de amasada	Amasada 3 (P3A)	Amasada 4 (P4A)
Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N	
Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	128,16	178,64
Resist. Compresión (Mpa)	27,0	35,5
Número de amasada	-	Amasada 7 (P7A)
Tipo de cemento	CEM I 52,5R	
Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	-	108,40
Resist. Compresión (MPa)	-	58,0

Tabla. 5.11. Datos de resistividad y resistencia a compresión amasadas 3, 4 y 7.

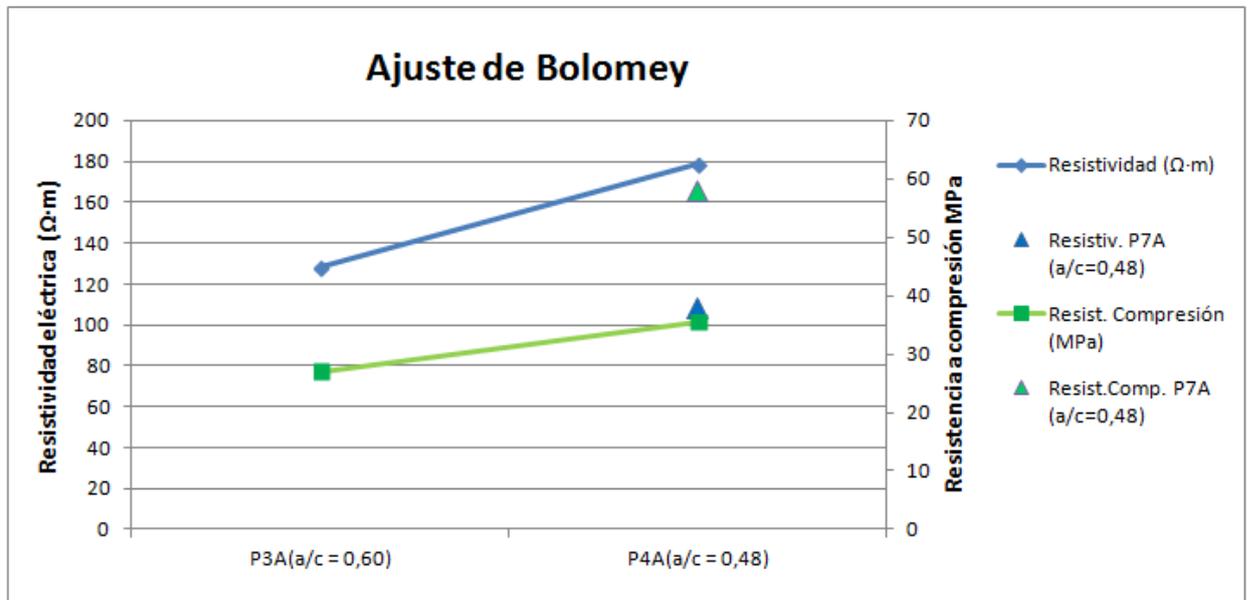
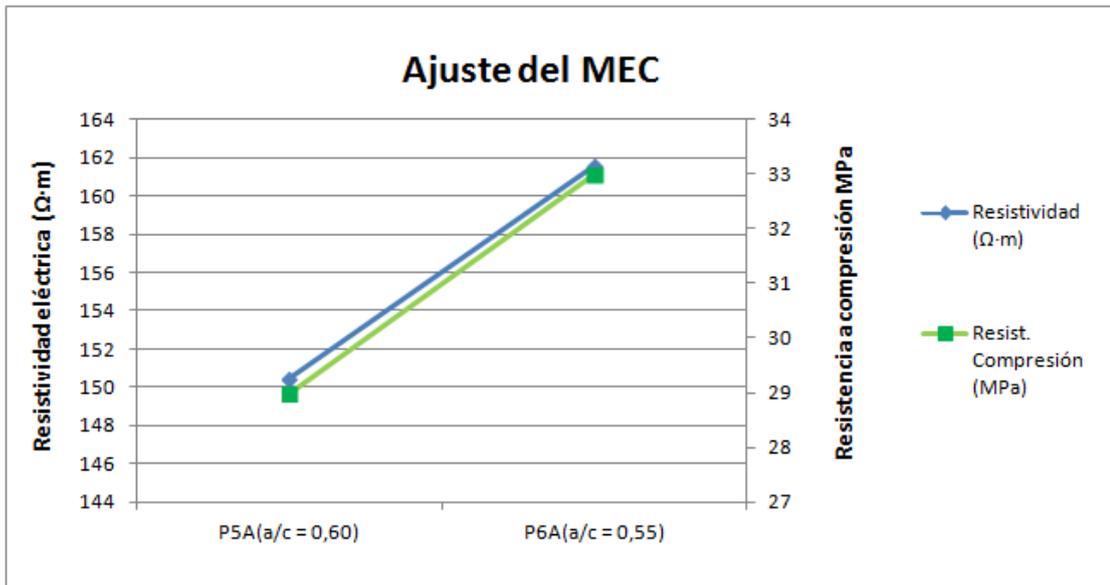


Fig.5.16. Representación de la resistividad y la resistencia a compresión amasadas 3,4 y 7.

Ajuste del MEC	Rel. a/c efectiva	
	0,60	0,55
Número de amasada	Amasada 5(P5A)	Amasada 6(P6A)
Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N	
Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	150,49	161,58
Resist. Compresión (MPa)	29,0	33,0

**Tabla. 5.12.** Datos de resistividad y resistencia a compresión amasadas 5 y 6.



**Fig. 5.17.** Representación de la resistividad y la resistencia a compresión amasadas 5 y 6.

### 5.3. Comparación de la resistencia a compresión según ajuste granulométrico.

Resistencia a compresión (MPa)				
Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N			* La amasada nº 6, se realizó con a/c= 0,55
Tipo de ajuste	Comercial	Bolomey	MEC	
0,60	23,0	27,0	29,0	
0,48*	30,5	35,5	33,0	
Tipo de cemento	CEM I 52,5R			
Tipo de ajuste	Comercial	Bolomey	MEC	
0,60	-	-	-	
0,48	-	58,0	-	

Tabla. 5.13. Datos de la resistencia a compresión.

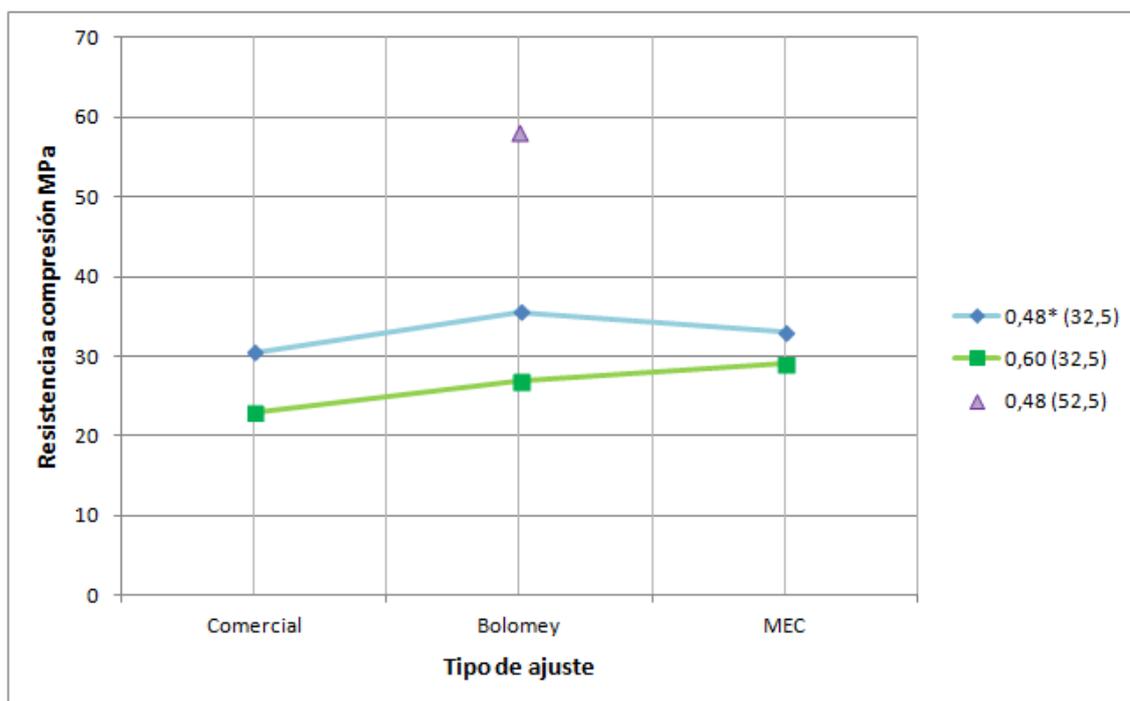


Fig. 5.18. Representación de la resistencia a compresión.

### 5.4. Comparación de la resistencia a tracción indirecta según ajuste granulométrico.

Resistencia a tracción indirecta (MPa)			
Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N		
Tipo de ajuste	Comercial	Bolomey	MEC
0,60	2,0	2,0	2,3
0,48*	2,49	3,3	2,9
Tipo de cemento	CEM I 52,5R		
Tipo de ajuste	Comercial	Bolomey	MEC
0,60	-	-	-
0,48	-	3,6	-

\* La amasada nº 6, se realizó con a/c= 0,55

Tabla. 5.14. Datos de la resistencia a tracción indirecta.

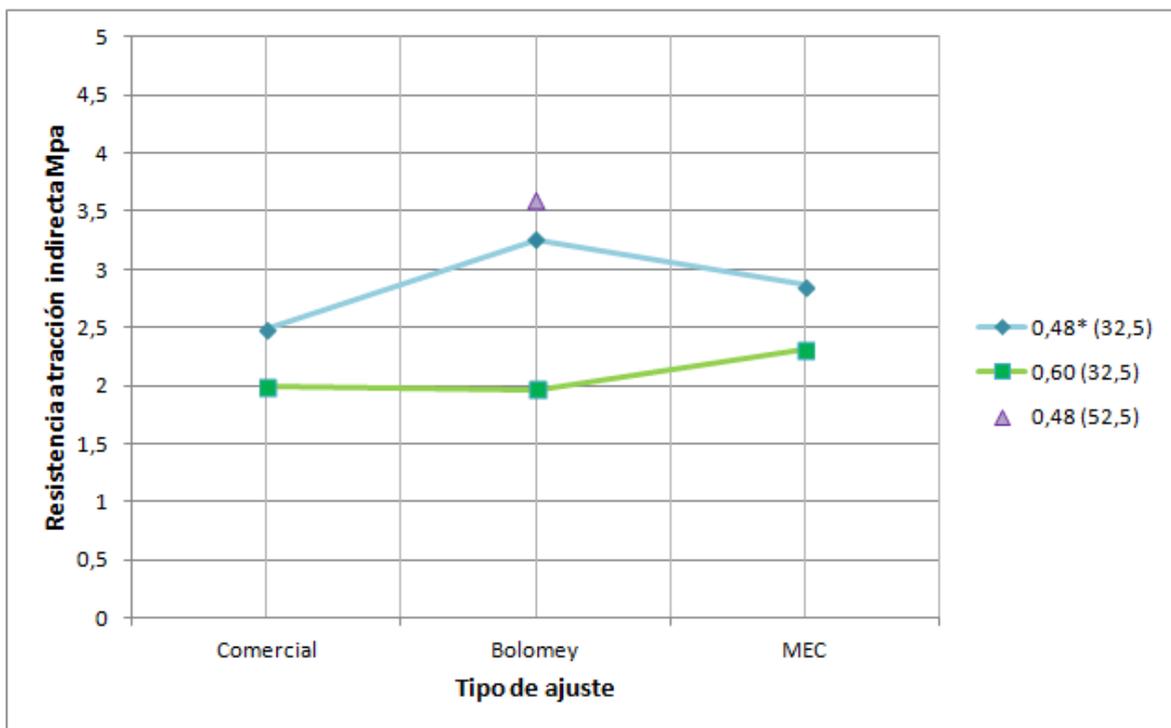


Fig. 5.19. Representación de la resistencia a tracción indirecta.

### 5.5. Comparación de las resistencias a tracción y a compresión (MPa).

Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N					
Tipo de ajuste	Comercial		Bolomey		MEC	
Número de amasada	Amasada 1	Amasada 2	Amasada 3	Amasada 4	Amasada 5	Amasada 6
Relación a/c	0,60	0,48	0,60	0,48	0,60	0,55
Resist.a compresión(Mpa)	23,0	30,5	27,0	35,5	29,0	33,0
Resit. a tracción(MPa)	2,0	2,5	2,0	3,3	2,3	2,9
Tipo de cemento	CEM I 52,5R					
Tipo de ajuste	Comercial		Bolomey		MEC	
Número de amasada	-	-	-	Amasada 7	-	-
Relación a/c	0,60	0,48	0,60	0,48	0,60	0,55
Resist.a compresión(Mpa)	-	-	-	58,0	-	-
Resit. a tracción(MPa)	-	-	-	3,6	-	-

Tabla. 5.15. Datos Resistencia a compresión y a tracción.

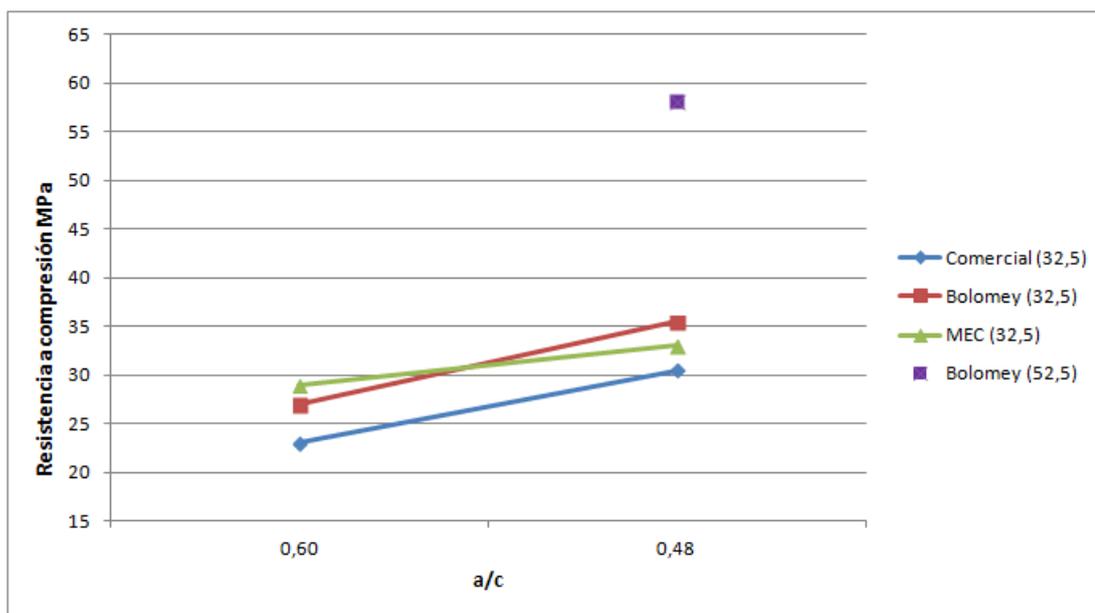


Fig. 5.20. Comparación de la resistencia a compresión de los distintos ajustes granulométricos en función de la relación a/c.

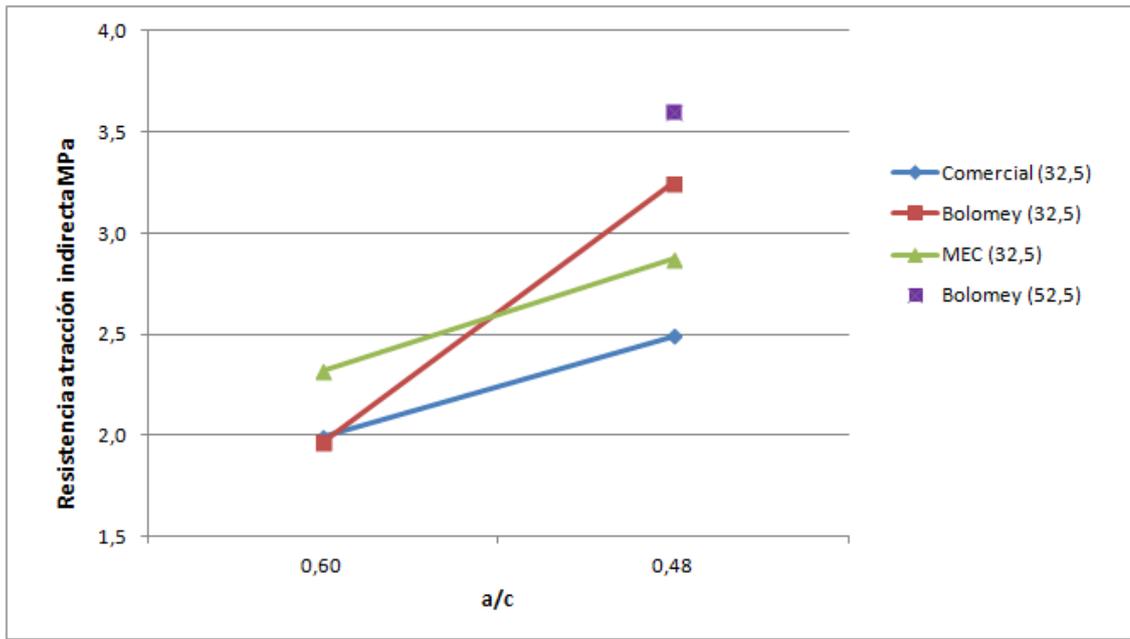


Fig. 5.21. Comparación de la resistencia a tracción indirecta de los distintos ajustes granulométricos en función de la relación a/c.

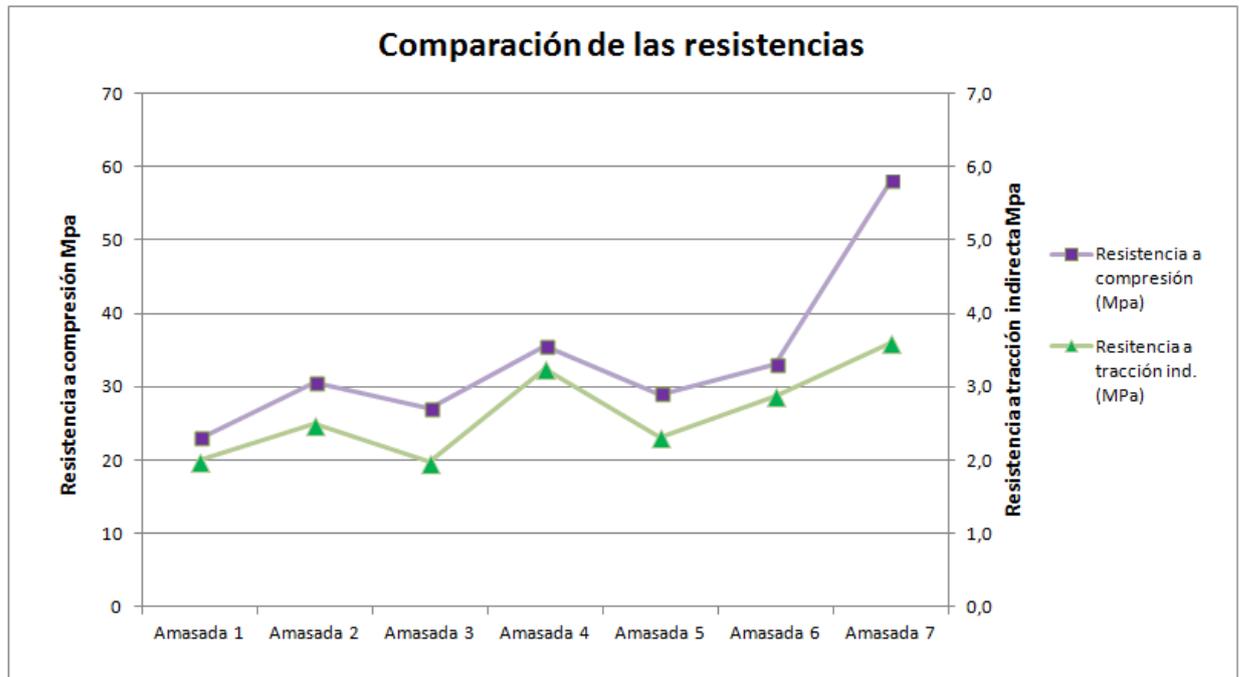


Fig. 5.22. Comparación de las resistencias a compresión y a tracción.

Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N					
Tipo de ajuste	Comercial		Bolomey		MEC	
Número de amasada	Amasada 1	Amasada 2	Amasada 3	Amasada 4	Amasada 5	Amasada 6
Relación a/c	0,60	0,48	0,60	0,48	0,60	0,55
Relación Resist compr./Resist. Tracc. Indirecta	12	12	14	11	13	11
Tipo de cemento	CEM I 52,5R					
Tipo de ajuste	Comercial		Bolomey		MEC	
Número de amasada	-	-	-	Amasada 7	-	-
Relación a/c	0,60	0,48	0,60	0,48	0,60	0,55
Relación Resist compr./Resist. Tracc. Indirecta	-	-	-	16	-	-

Tabla. 5.16. Relación entre las resistencias a compresión y a tracción.

### 5.6. Velocidad de impulsos ultrasónicos en m/s.

Velocidad de impulsos ultrasónicos (m/s)		
	Probeta A	Probeta B
Amasada 1	4010,7	4026,85
Amasada 2	3984,06	4109,59
Amasada 3	4231,31	4273,5
Amasada 4	4149,38	4231,31
Amasada 5	4010,7	4016,06
Amasada 6	4016,06	4000
Amasada 7	4297,99	4347,83

Tabla. 5.17. Velocidad de impulsos ultrasónicos (m/s).

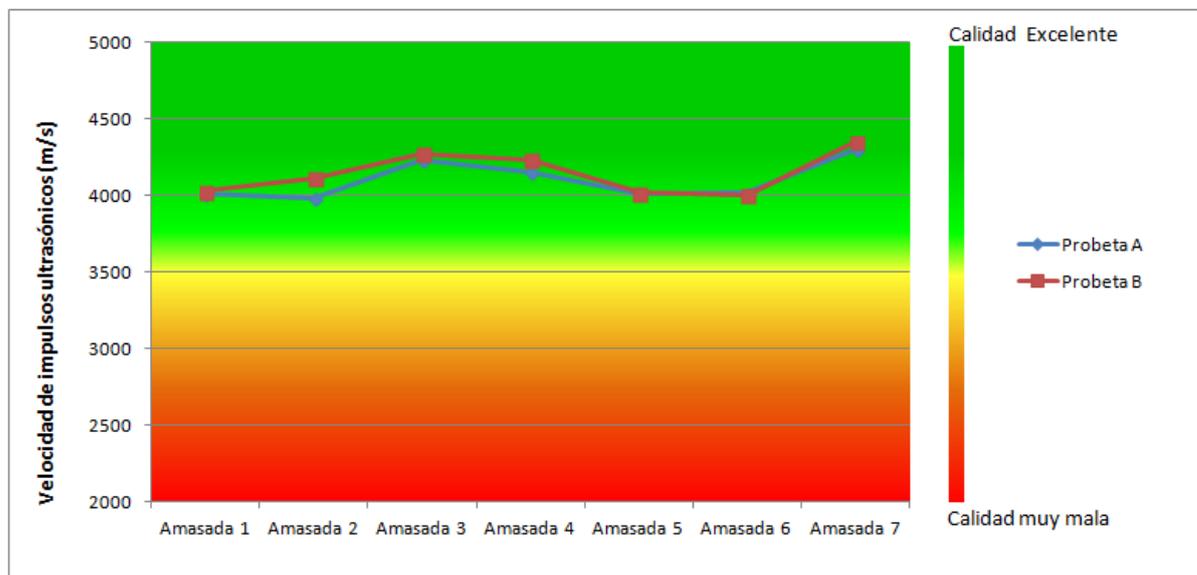


Fig. 5.23. Velocidad de impulsos ultrasónicos (m/s).

### 5.7. Penetración de agua a presión medida en el ensayo Brasileño.

Penetración (cm)	Amasadas	Punto de medida															Profundidad media de penetración(mm)	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		15
	Amasada 1 (0,60)	1	1,25	1,8	3	2,5	3	3	1,7	1,7	2	1,5	1,5	2	1,7	0,7	0	18,57
	Amasada 2 (0,48)	0	0,5	0,5	0,75	0,8	1,7	2,5	3,3	2,8	2	1,7	1,5	1,5	2	2	0	15,70
	Amasada 3 (0,60)	1,5	1,5	1,7	3,5	4	2,7	2,4	1,5	1,2	1	2	3	3	2,6	2,3	1,5	22,60
	Amasada 4 (0,48)	2	3	3,4	3,2	1,3	1,8	1,5	1,5	2,5	2,3	1,5	1	2	1	1	0,8	18,93
	Amasada 5 (0,60)	0	0,8	0,6	1	1,5	1	1,5	2	1,6	1,5	1	0,5	0,8	1,5	1,5	1	11,53
	Amasada 6 (0,55)	1,5	1,3	1,5	1,2	1,5	2	2	1,5	1,6	2	2,5	3	2	1,3	1	1,7	17,33
	Amasada 7 (0,48[Cem 52,5])	0,8	2,3	3	3,2	1,8	1,9	1,7	1,6	1,5	1,5	1,4	2	1	2	2,1	1,7	18,83

Tabla. 5.18. Datos penetración de agua medida en el ensayo Brasileño.

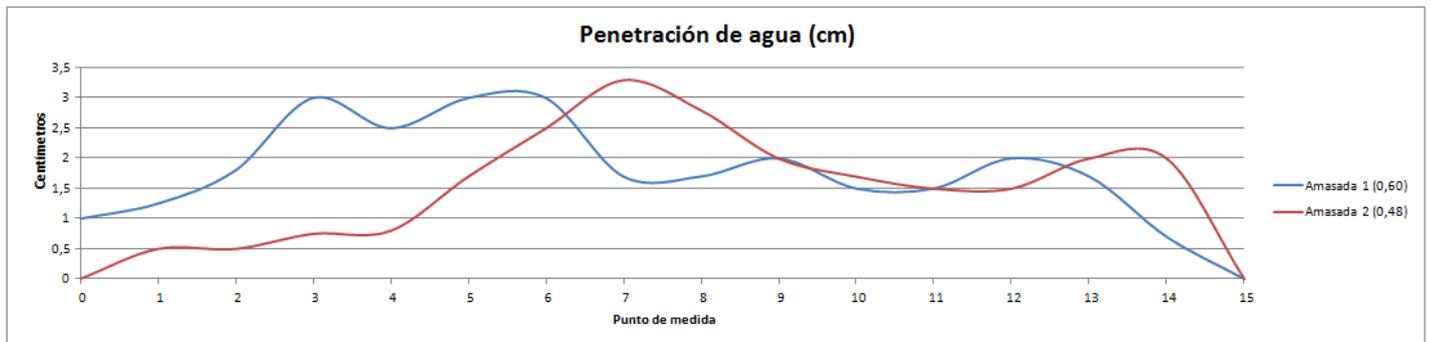


Fig. 5.24. Penetración de agua a presión amasadas 1 y 2.

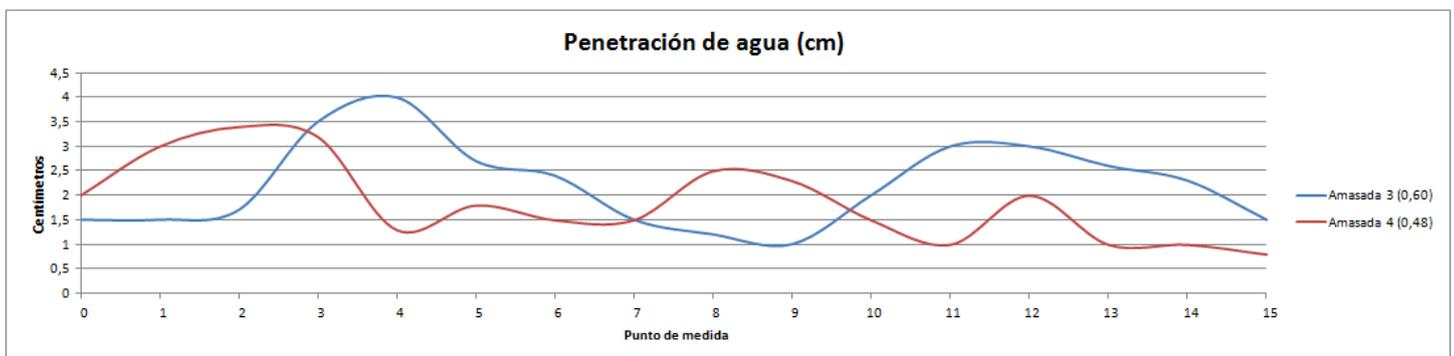
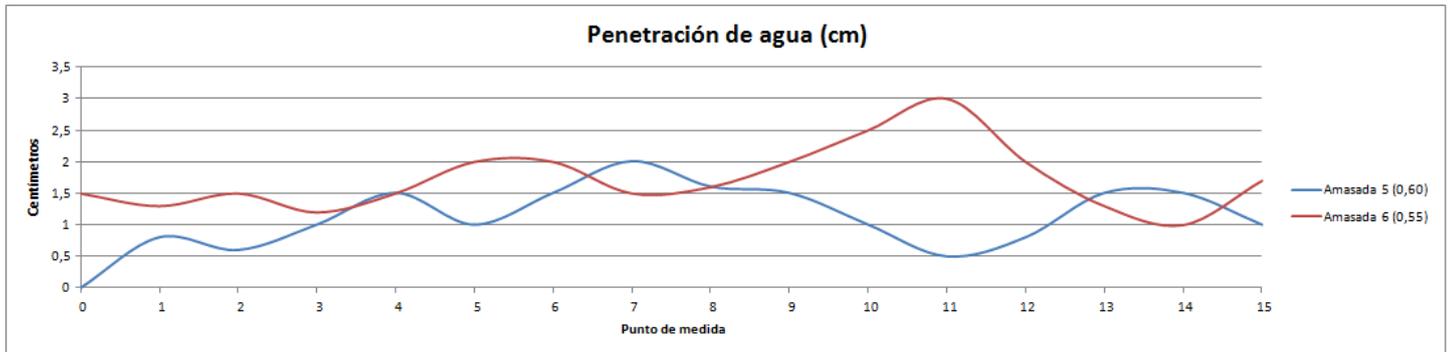
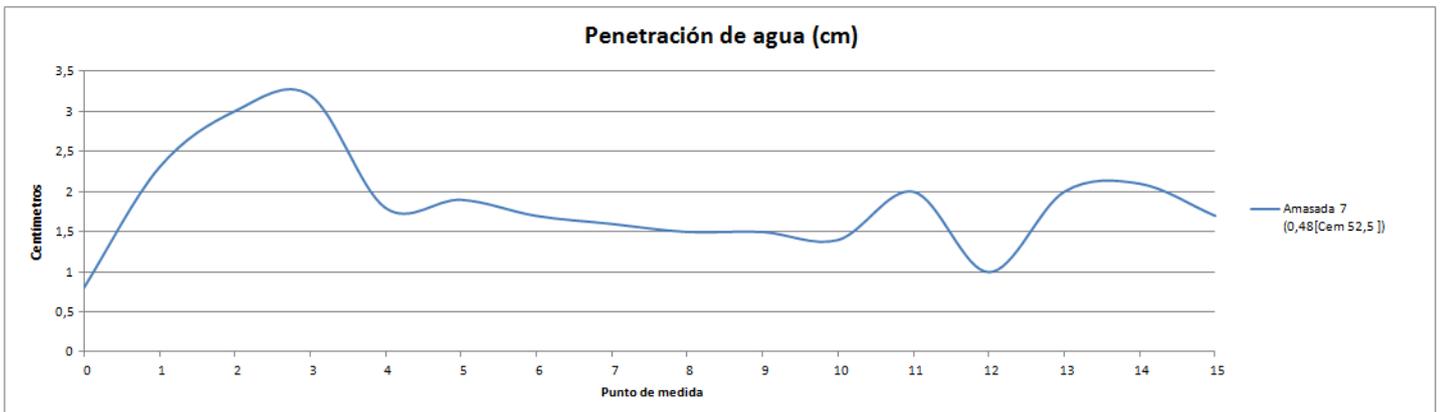


Fig. 5.25. Penetración de agua a presión amasadas 3 y 4.



*Fig. 5.26. Penetración de agua a presión amasadas 5 y 6.*



*Fig. 5.27. Penetración de agua a presión amasada 7.*

### 5.8. Comparación de la resistencia a compresión obtenida mediante ensayo de rotura y cálculo a través del módulo de elasticidad dinámico.

		Módulo de elasticidad dinámico (Ed) en MPa	Resistencia a compresión (MPa)	
			Calculado	Experimental
Amasada 1	Coef Poisson	Probeta 1a		
	0,17	33421,41	26,05	23,0
	0,2	32330,73	24,58	
	0,3	26685,68	18,34	
Amasada 2	Coef Poisson	Probeta 2a		
	0,17	32669,65	25,03	30,5
	0,2	31603,51	23,65	
	0,3	26085,43	17,81	
Amasada 3	Coef Poisson	Probeta 3a		
	0,17	37454,02	32,22	27,0
	0,2	36231,74	30,22	
	0,3	29905,56	21,62	
Amasada 4	Coef Poisson	Probeta 4a		
	0,17	36610,14	30,83	35,5
	0,2	35415,41	28,95	
	0,3	29231,76	20,87	
Amasada 5	Coef Poisson	Probeta 5a		
	0,17	33356,44	25,96	29,0
	0,2	32267,88	24,50	
	0,3	26633,81	18,29	
Amasada 6	Coef Poisson	Probeta 6a		
	0,17	33743,19	26,50	33,0
	0,2	32642,01	24,99	
	0,3	26942,61	18,58	
Amasada 7	Coef Poisson	Probeta 7a		
	0,17	39691,58	36,14	58,0
	0,2	38396,28	33,82	
	0,3	31692,17	23,76	

**Tabla. 5.19.** Valores de la resistencia a compresión obtenida mediante ensayo y mediante cálculo por medio del módulo de elasticidad dinámico.

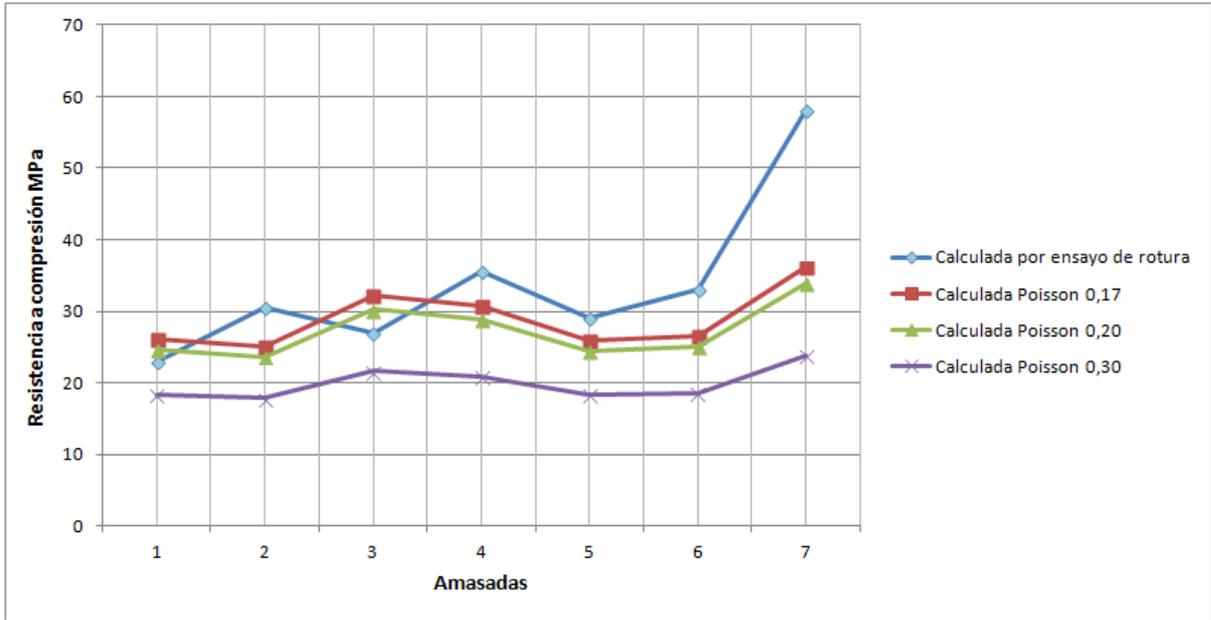


Fig. 5.28. Gráfico representativo de los valores de resistencia a compresión obtenidos mediante ensayo y calculado con tres valores del coeficiente de Poisson.

Tipo de cemento	CEM IV/B (P) 32,5N					
Tipo de ajuste	Comercial		Bolomey		MEC	
Número de amasada	Amasada 1	Amasada 2	Amasada 3	Amasada 4	Amasada 5	Amasada 6
Relación a/c	0,60	0,48	0,60	0,48	0,60	0,55
Error de la resistencia calculada con respecto a la experimental	-13%	18%	-19%	13%	10%	20%
Tipo de cemento	CEM I 52,5R					
Tipo de ajuste	Comercial		Bolomey		MEC	
Número de amasada	-	-	-	Amasada 7	-	-
Relación a/c	0,60	0,48	0,60	0,48	0,60	0,55
Error de la resistencia calculada con respecto a la experimental	-	-	-	38%	-	-

Tabla. 5.20. Porcentaje de error de las resistencias a compresión calculadas mediante el módulo de elasticidad dinámico con respecto a las medidas experimentalmente.

## **CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

### **DISCUSSION AND CONCLUSIONS**

## **6. Discusión y conclusiones.**

### **6.1. Variación de la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) y la resistividad ( $\Omega\cdot\text{m}$ ) en el tiempo.**

La densidad de las probetas permanece constante mientras que su resistividad va siempre en aumento, desde el día en que se desmoldan, día 1, hasta el día 28, en el que termina su curado.

### **6.2. Comparación de la resistividad a los 28 días y la resistencia a compresión de las probetas según el ajuste granulométrico.**

En la gráfica comparativa de la resistividad y la resistencia a compresión del apartado 5.2 de este estudio, se observa un aumento considerable en los valores tanto de las resistencias a compresión como de la resistividad en las amasadas realizadas con una relación a/c efectiva de 0,48 con respecto a las realizadas con a/c efectiva de 0,6.

En la amasada número 7, realizada con CEM I 52,5R y relación a/c efectiva de 0,48, se observa que la resistividad desciende significativamente mientras que la resistencia a compresión aumenta de manera considerable con respecto a la amasada número 4, que se diferencia de la 7 porque se confeccionó con CEM IV /B (P) 32,5N.

### **6.3. Comparación de la resistencia a compresión según ajuste granulométrico.**

En la figura 5.18 se observa la evolución de la resistencia a compresión al modificar el ajuste granulométrico. Destaca la obtención de resistencias más altas siempre que se usa una menor relación a/c (0,48) y se observa un importante aumento de las mismas al emplear CEM I 52,5R en la amasada número 7.

El ajuste de Bolomey, tanto con el CEM IV /B (P) 32,5N como con el CEM I 52,5R da lugar a las más altas resistencias cuando se utiliza la relación a/c de 0,48.

El ajuste del MEC proporciona las resistencias más altas para la relación a/c de 0,6, no siendo así en el caso de la relación agua cemento de 0,48.

### **6.4. Comparación de la resistencia a tracción indirecta según ajuste granulométrico.**

En el caso de la resistencia a tracción indirecta sucede lo mismo que en la resistencia a compresión, las resistencias más elevadas se obtienen con la menor relación a/c, y el empleo del CEM I 52,5R obtiene de nuevo la resistencia más alta, aunque en este caso no dista tanto (un 8,3%) de la obtenida en la amasada 4, que es la mejor resistencia obtenida con CEM IV/B (P) 32,5N.

Para la a/c de 0,6 se obtienen 2 MPa tanto para la granulometría comercial como en Bolomey, siendo el resultado más alto el obtenido por el ajuste del MEC, tal y como sucede con la resistencia a compresión para esta dosificación de agua. La variación de los datos de resistencia a tracción indirecta para la relación 0,6 es del 13%.

## 6.5. Comparación de las resistencias a tracción y a compresión (MPa).

En el apartado 5.5 se plantea otra forma de analizar las resistencias, las gráficas de las figuras 5.20 y 5.21 presentan las resistencias de cada ajuste granulométrico en función de la relación a/c, y en ellas se puede observar que las resistencias, tanto a tracción indirecta como a compresión mejoran disminuyendo la cantidad de agua empleada en la dosificación.

El mayor aumento de resistencias, como ya se ha visto se obtiene por el ajuste de Bolomey.

La resistencia a compresión obtenida en la amasada 7 (CEM I 52.5R y a/c=0,48) supera en un 39% la obtenida en la amasada 4, realizada con la misma dosificación, pero utilizando CEM IV/B (P) 32,5N, por lo que sería muy interesante llegar a realizar las amasadas 5 y 6 cambiando el tipo de cemento y cambiando el cemento y el aditivo por uno de policarboxilatos, que permitan utilizar la relación a/c de 0,48 o incluso bajar a 0,35.

Comparando las resistencias a compresión y a tracción indirecta de cada una de las amasadas entre sí, como hace la gráfica de la figura 5.22 del apartado 5.5 de este estudio, se puede observar que varían de manera similar, con picos más o menos pronunciados en las amasadas con relación a/c de 0,48. Y que las amasadas con relación a/c de 0,60, dan lugar a resistencias más bajas.

La relación entre la tracción indirecta y la compresión varía entre las 11 y las 14 unidades en el caso de las amasadas realizadas con CEM IV/B (P) 32,5N, y es de 16 para la amasada 7, que fue confeccionada con CEM I 52.5R.

En términos generales, según indica Fernández Cánovas <sup>[8]</sup>, la relación anteriormente descrita debe de ser en torno a diez unidades.

## **6.6. Velocidad de impulsos ultrasónicos en m/s.**

Los valores de la velocidad de impulsos ultrasónicos varían entre los 3894.06 y los 4347.83 m/s, lo cual, según Fernández Cánovas <sup>[8]</sup>, corresponde con una buena calidad del hormigón.

## **6.7. Penetración de agua a presión medida en el ensayo Brasileño.**

La tabla 5.18 del apartado 5.6 de este estudio, muestra la profundidad media de penetración de agua en mm para cada amasada, siendo la amasada número 5 la más impermeable y la número 3 la más permeable siendo la variación entre ellas del 49%.

La amasada número 7 que ha sido la que mayores prestaciones ha obtenido en el resto de análisis, es la tercera amasada más impermeable, lo cual podría intentar mejorarse cambiando el aditivo utilizado por policarboxilatos que den mejor adherencia y cohesión a la masa.

## **6.8. Comparación de la resistencia a compresión obtenida mediante ensayo de rotura y cálculo a través del módulo de elasticidad dinámico.**

En la gráfica de la figura 5.28 se observa que el valor del coeficiente de Poisson con el que se obtiene una resistencia más cercana a la real es el 0,17, con el mayor error (38%) ocurrido en la amasada 7, que se detalla más abajo y el menor error se obtuvo en la amasada 5, el cual fue del 10%.

En dicha gráfica se observa que las resistencias a compresión calculadas se mantienen por debajo de la experimental excepto en las amasadas 1 y 3, estando en la 1 un poco por encima y, alejándose en la 3 algo más del valor experimental de la resistencia. Sin embargo, el resto de amasadas mantienen una distancia más o menos constante exceptuando la de la número 7, cuya disparidad o lejanía con los datos experimentales se debe a que el cálculo

estimado de la resistencia a compresión por el módulo de elasticidad dinámico está indicado para hormigones normales, mientras que el obtenido en esta amasada puede considerarse de altas prestaciones, por superar los 50 MPa según indica la EHE-08 <sup>[5]</sup> en su artículo “31.3. Características mecánicas”.

## **6. Discussion and conclusions.**

### **6.1. Variation of the density (kg/m<sup>3</sup>) and resistivity ( $\Omega \cdot m$ ) over time.**

The specimens density remains constant while its resistivity is always increasing from the day they were demolded, day 1, to day 28, which finishes its curing.

### **6.2. Comparison of the resistivity at 28 days and the compressive strength of the specimens according to sieve setting.**

In the comparative chart of the resistivity and the compressive strength seen at 5.2 of this document, a significant increase in the values of both the compressive strength and the resistivity in the mixes performed with a ratio a / c effective of 0.48 is observed relative to those with a / c effective of 0.6

In the mix number 7, made with CEM I 52.5 R and ratio w / c effective of 0.48 , it is observed that the resistivity decreases significantly and the compressive strength increases substantially relative to the mix number 4, mix 7 differs from 4 for being made with CEM IV / B (P) 32.5 N.

### **6.3. Comparison of the compression strength according to the sieve setting.**

In Figure 5.18 the evolution of compressive strength by changing the particle size adjustment is observed. Stresses obtaining higher resistances whenever a lower w / c ratio (0.48) is used, and it is also observed a significant increase of the same when using CEM I 52.5 R in the mix number 7.

In the Bolomey setting, both the CEM IV / B (P) 32.5N as the CEM I 52.5R, gave higher strength results when the ratio w / c of 0.48 is used.

The CPM adjustment provides the highest resistance to the  $w / c$  of 0.6, which is not so in the case of water cement ratio of 0.48.

#### **6.4. Comparison of tensile splitting strength according sieve adjustment.**

In the case of indirect tensile strength occurs as in the compressive strength, higher strengths are obtained with lower  $w / c$  ratio, and the use of CEM I 52.5R again obtains the highest resistance, though in this case is not so far (8.3%) from the one obtained in the mix number 4 which is the best resistance obtained with CEM IV / B (P) 32.5N.

For the  $w / c$  of 0.6, 2 MPa are obtained for both granulometries, the commercial and Bolomey, being the highest score obtained by the setting of CPM, as happens with the compressive strength for this water dosing. The variation of the data in indirect tensile strength for the  $w / c$  ratio of 0.6 is 13%.

#### **6.5. Comparison of tensile and compressive strengths (MPa).**

In section 5.5 another way to analyze the resistance is raised, the graphs of Figures 5.20 and 5.21 show the resistances of each sieve adjustment for the ratio  $w / c$ . There can be seen that the resistance, of both, tensile splitting and compressive improve as the amount of water used in the mixes is decreased.

The largest increase in resistance, as has been seen, is obtained by the adjust of Bolomey.

The compressive strength obtained in the mix 7 (CEM I 52.5R and  $w / c = 0.48$ ) exceeds in a 39% the one obtained with the mix 4 on the same dosage, but using CEM IV / B (P) 32.5N. So it would be very interesting to get to make those mixes, 5 and 6, changing the type of cement and changing both, the cement and the additive, this one into a polycarboxylate additive, which allows for the  $w / c$  of 0.48 or even getting down to 0.35.

At the comparison of the compressive and tensile splitting strength of every mix between each other, as done in the graph in Figure 5.22 of paragraph 5.5 of this document, it

can be seen that they vary similarly, with more or less pronounced peaks in the mixes with w / c ratio of 0.48. And it can also be observed that mixed with w / c ratio of 0.60, give lower strengths.

The relationship between tensile splitting and compressive strength varies between 11 and 14 units in the case of mixes made with CEM IV / B (P) 32.5 N, and is 16 for the mix number 7, which was made with CEM I 52.5R.

In general terms, according to Fernandez Cánovas <sup>[8]</sup>, the relationship described above should be about ten.

### **6.6. Ultrasonic pulse velocity in m / s.**

The values of the velocity of ultrasonic pulses vary between 3894.06 and 4347.83 m / s, which, according to Fernandez Cánovas <sup>[8]</sup>, correspond to a good quality of concrete.

### **6.7. Deep of penetration of water under pressure measured in the Brazilian test.**

The table 5.18, in section 5.6 of this study shows the average depth of water penetration in mm for each mix, being the most waterproof the mix number 5 and the mixture more permeable the number 3. The variation between them is 49%.

The mixture 7 which has achieved the biggest benefit in other analyzes, is the third more waterproof mix. This result could be improved by changing the additive by a polycarboxylate one, in order to give better adhesion and cohesion to the mass.

## **6.8. Comparison between the compressive strength obtained by the experimental essay and the calculated via the dynamic elasticity modulus.**

Figure 5.28 shows that the value of Poisson's ratio which results closer to the experimental strength is 0.17. The largest error (38%) occurred in the batch 7, which is detailed below, and the lowest error was obtained in the mix 5, which was 10%.

This figure shows that the calculated compressive strengths remain below the experimental except for mixes 1 and 3. Being the number 1 above the experimental one, and number 3 farther from the experimental value of the resistance. However, the remaining mixes maintain a roughly constant distance. It is not the case for number 7, whose gap or distance with the experimental data is due to the fact that the calculated compressive strength via the dynamic elasticity modulus is suitable for normal concrete, while the resistance obtained in this mix allows to consider this concrete as a high performance concrete by exceeding the 50 MPa indicated by the EHE-08 [5], in its article "31.3. Mechanical properties".

## CAPÍTULO 7. ANEXOS

## 7. Anexos.

### 7.1. Anexo fotográfico:

En este anexo se muestra gráficamente la confección de cada una de las amasadas, para que se puedan observar sus características físicas así como los detalles del procedimiento.

#### Amasada 1:



*Fig. 7.1. Proceso de obtención de materiales para el amasado del hormigón.*



*Fig. 7.2. Proceso de amasado, cono de Abrams y medida del escurrimiento.*



*Fig. 7.3. Confección y desmolde de las probetas.*



*Fig. 7.4. Rotura a compresión de la probeta 1a.*



*Fig. 7.5. Ensayo de penetración de agua y rotura a tracción indirecta de la probeta 1b.*

Amasada 2:



*Fig. 7.6. Proceso de amasado y obtención del cono de Abrams.*



*Fig. 7.7. Rotura a compresión de la probeta 2a.*

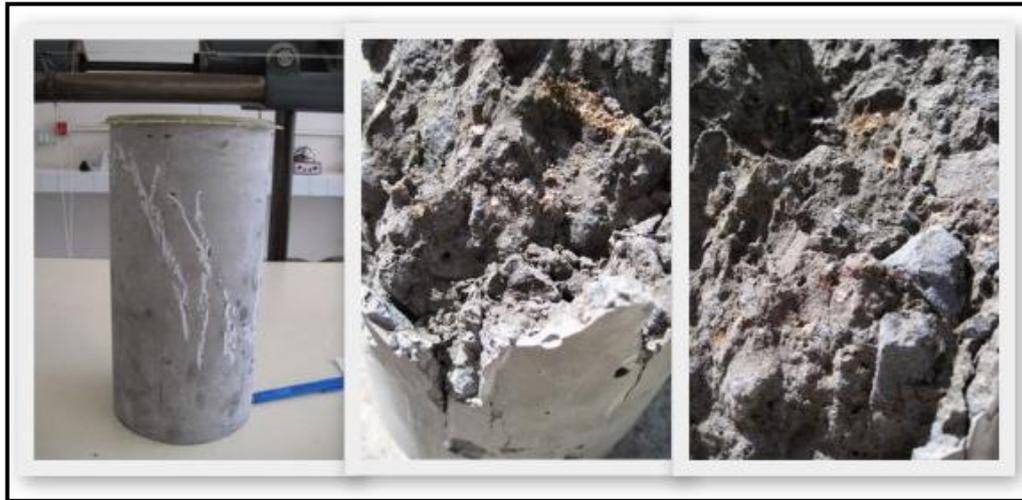


*Fig. 7.8. Rotura a tracción indirecta, ensayo de penetración de agua y medida de la carbonatación de la probeta 2b.*

Amasada 3:



*Fig. 7.9. Proceso de amasado, cono de Abrams y medida del escurrimiento.*



*Fig. 7.10. Rotura a compresión de la probeta 3a.*



*Fig. 7.11. Detalle de la rotura de los áridos y coqueas en el interior de la probeta.*



*Fig. 7.12. Ensayo de penetración de agua y rotura a tracción indirecta de la probeta 3b.*

Amasada 4:



*Fig. 7.13. Proceso de amasado, cono de Abrams, y vibrado de la probeta.*



*Fig. 7.14. Rotura a compresión de la probeta 42a.*



*Fig. 7.15. Ensayo de penetración de agua y rotura a tracción indirecta de la probeta 4b.*

Amasada 5:



*Fig. 7.16. Proceso de amasado y cono de Abrams.*



*Fig. 7.17. Rotura a compresión de la probeta 5a.*



*Fig. 7.18. Ensayo de penetración de agua y rotura a tracción indirecta de la probeta 5b.*

Amasada 6:



*Fig. 7.19. Proceso de amasado y cono de Abrams.*



*Fig. 7.20. Rotura a compresión de la probeta 6a.*



*Fig. 7.21. Ensayo de penetración de agua y rotura a tracción indirecta de la probeta 6b.*

Amasada 7:



*Fig. 7.22. Proceso de amasado y cono de Abrams.*



*Fig. 7.23. Rotura a compresión de la probeta 7a.*



*Fig. 7.24. Detalle de la rotura de los áridos de la probeta 7a.*



*Fig. 7.30. Ensayo de penetración de agua y rotura a tracción indirecta de la probeta 7b.*

## CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

## 8. Bibliografía.

- [1] Benites Espinoza, C.M. (2011), *Concreto con cemento portland puzolánico tipo IP ATLAS de resistencias tempranas con la tecnología SIKA VISCORETE 20HE*. Tesis. Perú: Universidad Ricardo Palma.
- [2] Calleja, J. (1996) *Recomendaciones para la utilización de los cementos de las normas UNE*. Instituto del cemento y sus aplicaciones.
- [3] De Larrard (1999) *Curso de Formation à BétonlabFree*. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Centre de Nantes.  
Disponibile en: <http://www.lcpc.fr/francais/produits/betonlabpro/article/formation-a-betonlabfree>. Última visita junio 2014.
- [4] De Larrard (1999) Software BétonlabFree3.  
Disponibile en: <http://www.lcpc.fr/francais/produits/betonlabpro/article/lcpc-produits-betonlabpro-1704>. Última visita junio 2014.
- [5] **EHE-08**. *Instrucción de Hormigón Estructural*. Real Decreto 1247/2008. Ministerio de Fomento.
- [6] Espinoza Moreno, A.A. (2010) *Estudio de dosificación de ultra-alta resistencia basado en el empaquetamiento de los áridos*. TFM. Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] Fernández Cánovas, M. (2007) *Hormigón*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- [8] Fernández Cánovas, M. (1994) *Patología y Terapéutica del Hormigón Armado*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

- [9] Formagini, S; Fairbairn, E; Toledo, R.D; y Silvano, M.M. (2005) Dosificación y comportamiento mecánico de conglomerantes hidráulicos de muy altas prestaciones. Cemento y Hormigón. Nº 878.
- [10] Gallego Torres, C. (2011) Estudio de la calidad de los finos de áridos de Tenerife empleados en el hormigón. TFC. Universidad de La Laguna.
- [11] González Díaz, E. y Alloza Moreno A.M. (2012) Curso de Prácticas de Materiales de Construcción. OCW. Universidad de La Laguna.
- [12] González Díaz, E. y Alloza Moreno A.M. (2011) Materiales de Construcción. Sesiones Prácticas. Creative Commons.
- [13] González Díaz, E. y Alloza Moreno A.M. (2012) Problemas de dosificación de Hormigones. Servicio de publicaciones de la Universidad de La Laguna.
- [14] Martínez Ponce, D. (2008). Hormigones de altas prestaciones. PFC. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [15] Ramos, D. (Junio 2009). El empleo de aditivos en la confección de hormigones de alta durabilidad. *Zuncho*. Nº 20. Páginas 29-37.
- [16] **RC-08**. *Instrucción para la Recepción de Cementos*.R.D. 956/2008. Ministerio de Fomento.
- [17] **UNE- EN 206-1:2008**. Hormigón. Parte 1: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad.
- [18] **UNE-EN 933-1:2012**. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Método del tamizado.
- [19] **UNE-EN 933-2:1996**. Ensayo para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.
- [20] **UNE-EN 934-2:2010+A1:2012** .Aditivos para hormigones, morteros y pastas. Parte 2: Aditivos para hormigones. Definiciones, requisitos, conformidad, marcado y etiquetado.
- [21] **UNE-EN 12350-1:2009**. Ensayos de hormigón fresco. Parte 1: Toma de muestras.

- [22] **UNE-EN 12350-2:2009.** Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.
- [23] **UNE-EN 12390-1:2013.** Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras **características de las probetas y moldes.**
- [24] **UNE-EN 12390-2:2009.** Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.
- [25] **UNE-EN 12390-3:2009/AC: 2011.** Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- [26] **UNE-EN 12390-4:2001.** Ensayos de hormigón endurecido. Parte 4: Resistencia a compresión. Características de las máquinas de ensayo.
- [27] **UNE-EN 12390-6:2010.** Ensayos de hormigón endurecido. Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas.
- [28] **UNE-EN 12390-8:2009/1M 2011.** Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.
- [29] **UNE-EN 12504-4:2006.** Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.
- [30] **UNE-EN 12620:2003+A1:2009.** Áridos para hormigón.
- [31] **UNE-EN 13055-1:2003.** Áridos ligeros. Parte 1: Áridos ligeros para hormigón, mortero e inyectado.
- [32] **UNE 83988-1:2008.** Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia).
- [33] **UNE 83988-2:2014.** Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner.