

**UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE LOS  
MATERIALES**



**TESIS DOCTORAL**

**INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE RESÍDUOS EN LAS PROPIEDADES DEL  
HORMIGÓN**

Doctorando: Alberto Manuel Escalera López

Badajoz, Julio de 2013

# UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE LOS

MATERIALES



D. ANTONIO MACÍAS GARCÍA, Dña. M<sup>a</sup> ANGELES DÍAZ DÍEZ, profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de los Materiales de la Escuela de Ingenierías Industriales, y D. EDUARDO MANUEL CUERDA CORREA, profesor del Departamento de Química Orgánica e Inorgánica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Extremadura,

## CERTIFICAN:

Que la Tesis Doctoral realizada por D. ALBERTO MANUEL ESCALERA LÓPEZ con el título "**INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE RESÍDUOS EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN** " bajo nuestra dirección, reúne los requisitos necesarios de calidad, originalidad y presentación para optar al grado de Doctor, y está en condiciones de ser sometida a valoración de la Comisión encargada de juzgarla.

Dr. D. Eduardo Manuel

Dr. D. Antonio

Dra. D<sup>a</sup> M<sup>a</sup> Ángeles

Cuerda Correa

Macías García

Díaz Díez

Badajoz, Julio de 2013

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a toda mi familia, a mis padres en primer lugar por hacerme como soy, inquieto, curioso, constante y disciplinado, a mi hermana y a mi cuñado por soportar estoicamente mis explicaciones de los resultados, y finalmente a mi esposa Rosa y a mis hijos Juan, María, Ester y Santiago Javier, por el apoyo que me han prestado cada vez que se han visto obligados a olvidar sus necesidades para permitirme avanzar en la investigación.

No puedo olvidar la ayuda física, técnica y moral que me han dado constantemente mis compañeros de trabajo D. José Escudero y D. Antonio Ruiz, sin cuyo sacrificio no habría llegado a buen puerto este estudio.

Es necesario mencionar a la empresa PRAINSA, que confió en mí durante 25 años, y en cuyo seno aprendí todo lo que hoy puedo trasladarles y que ya empecé a desarrollar en la empresa que, bajo las órdenes de D. Jaime Raventos, levanté en Extremadura, ESTARSA.

Finalmente, solo orden cronológico, la inestimable ayuda de mis directores de Tesis, D. Antonio Macías, D. Eduardo M. Cuerda y D<sup>a</sup> María Ángeles Díaz, que me han formado en el camino a seguir en cualquier investigación de este tipo, me han hecho mantener la ilusión en los momentos de mayor debilidad por las dudas que siempre surgen en las esperas de los resultados, y que en la etapa final de la ejecución, han sufrido conmigo los problemas que entraña la crisis actual, que me han llevado a la salida de nuestra Patria para continuar trabajando en Francia, y sin cuya ayuda no habría podido terminar.

## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1.-INTRODUCCIÓN. ....</b>	<b>2</b>
<b>1.- ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL.....</b>	<b>2</b>
1.1.- Aspectos generales de los paneles prefabricados de hormigón.....	4
1.2.- Descripción de los componentes de los paneles prefabricados de hormigón .....	6
1.2.1.- Cemento.....	6
1.2.2.- Áridos .....	8
1.2.3.- Agua .....	10
1.2.4.- Aditivos .....	11
1.2.5.- Fibras.....	12
1.2.6.- Corcho .....	13
1.3.- Proceso de fabricación de los paneles prefabricados de hormigón .....	14
1.3.1.- Preparación del molde. ....	14
1.3.2.- Dosificado, hormigonado y compactación del hormigón. ....	14
1.3.3.- Adición de materiales aislantes y procesos de acabado superficial. ....	15
1.3.4.- Curado.....	15
1.3.5.- Desmoldeo. ....	15
1.3.6.- Almacenamiento. ....	16
1.4.- Productos naturales como aditivos del hormigón. ....	16
1.5.- Empleo del corcho en la formulación de hormigones. ....	18
<b>CAPÍTULO 2.- OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO .....</b>	<b>27</b>
<b>1.- OBJETIVOS.....</b>	<b>27</b>
<b>2.- PLAN DE TRABAJO. ....</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 3.- MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
3.1.- Introducción al diseño de experimentos .....	30
3.1.1.-El diseño de experimentos (DOE) como estrategia experimental.....	31
3.1.2.- Tipos de DOE. ....	32
3.1.3.- El diseño factorial $2^k$ .....	33

3.1.4.- El método de la superficie de respuesta.....	33
3.1.5.- El diseño central compuesto (CCD).....	34
3.1.6.- Ortogonalidad y Rotabilidad.....	35
3.1.7.- Metodología Experimental.....	36
3.2.- Preparación de las muestras.....	37
3.2.1.- Selección de productos a ensayo.....	37
3.2.2.- Desarrollo de las pruebas preliminares y objetivos.....	38
3.2.3.- Materiales empleados en la preparación de las probetas.....	46
3.2.4.- Diseño de experimentos.....	61
3.2.5.- Procedimiento de preparación de las muestras.....	63
3.2.6.-Compuestos obtenidos y características.....	65
3.3.- Caracterización de las muestras.....	66
3.3.1.-Microscopía óptica.....	66
3.3.2.- Microscopía electrónica de barrido - Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDX). .....	67
3.3.3.- Determinación de la resistencia a flexión.....	67
3.3.4.- Determinación de la resistencia a compresión.....	68
3.3.5.- Determinación de la densidad.....	68
3.3.6.- Determinación de la capacidad de transmisión térmica.....	69
3.3.7.- Determinación del coeficiente de extinción de ruido.....	69
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>73</b>
4.1.- Caracterización de las muestras.....	73
4.1.1. Microscopía óptica.....	73
4.1.2. Microscopía electrónica de barrido - espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDX). .....	74
4.2.- Análisis estadístico.....	79
4.2.1.- Resistencia a flexión.....	79
4.2.2.- Resistencia a compresión.....	96
4.2.3.- Densidad.....	108
4.2.4.- Coeficiente de transmisión térmica.....	120
4.2.5.- Coeficiente de extinción de ruido.....	127
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>132</b>



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

## **CAPÍTULO 1.-INTRODUCCIÓN.**

### **1.- ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL**

El hormigón es una mezcla íntima y homogénea de áridos finos y gruesos con un aglomerante hidráulico y agua en las debidas proporciones para su óptimo fraguado y endurecimiento. En el momento de su amasado, pueden añadirse otros productos o materiales para mejorar alguna de sus características, siempre con el objetivo de conseguir una masa tan compacta como sea posible.

En el caso particular de hormigones fabricados con cemento, puede definirse el hormigón como una mezcla íntima y homogénea de áridos gruesos y finos con cemento y agua.

Según las características específicas de los componentes del hormigón o de los materiales a él incorporados, éste puede recibir distintas denominaciones:

- Hormigón ordinario: obtenido al mezclar cemento, agua y áridos minerales de tamaños varios (definido por el diámetro máximo) de forma homogénea y compacta, siendo dicha compactidad, salvo por características individuales de sus componentes especiales, la que le dote de uno de sus principales valores como es su resistencia a compresión. Suelen ser impermeables al aire y al agua y buenos conductores de vibraciones y calor.
- Hormigón en masa: constituido únicamente por hormigón, no contiene en su interior armadura de ninguna clase. Es apto para resistir esfuerzos de compresión.
- Hormigón armado: hormigón con refuerzo interior en base a armadura de acero especial (corrugado o armadura pasiva). Dicha armadura trabajará al ser traccionado el conjunto, es decir, al entrar en carga. Debe tenerse en cuenta que las resistencias a flexotracción del hormigón son menores de la décima parte de las de compresión.

- Hormigón pretensado: hormigón con armadura de acero interior (denominada armadura activa) de uno o varios diámetros, la cual ha sido sometida a tracción previamente a su hormigonado (sin superar el 75% de su límite elástico) para que, una vez fraguado el hormigón, transmita esa tensión de tracción y el conjunto trabaje correctamente. Estos hormigones también presentan en su interior armaduras pasivas, que colaborarán en el comportamiento del conjunto y ayudarán a transmitir las tensiones generadas en la masa por la armadura activa sin que el hormigón sufra por fisuras por esfuerzos anómalos.
- Hormigón postensado: hormigón armado en el que se embuten unas vainas corrugadas por las que, una vez que la masa ha adquirido la resistencia necesaria, se introducen unos cables de acero que son tensados hasta la tensión de diseño y posteriormente rellenados con un mortero fluido de alta resistencia, que será el encargado de transmitir las tensiones de los cables al conjunto de las piezas de hormigón.
- Hormigón mixto: hormigón en el que se emplean mezclas de dos o más componentes cuyos nombres deberán incluirse en la denominación del mismo.
- Hormigón ciclópeo: hormigón que tiene embebidos en su masa grandes mampuestos con una dimensión mínima de 30 cm de tal forma que el conjunto no pierda la compacidad.
- Hormigón aerocluso: hormigón que tiene una cantidad de aire incorporado uniformemente distribuido en toda la masa en forma de burbujas (de tamaño comprendido entre 0,05 y 0,1 mm) no superando el 6% de su volumen.
- Hormigón unimodular: hormigón con áridos de un solo tamaño.
- Hormigón ligero o liviano: hormigón que contiene áridos ligeros, que disminuyen su peso específico, y cemento como ligante hidráulico. Presentan bajo peso específico, baja resistencia a compresión y elevada capacidad de aislamiento térmico y acústico. Una variante muy estudiada es el hormigón celular, que contiene burbujas independientes de gas uniformemente repartidas.

- Hormigón blindado: unidad de obra utilizada en pavimentaciones, compuesta por una capa de espesor variable de hormigón ordinario y otra superior embutida de piedra u otro material compacto
- Amianto-cemento: hormigón cuyo árido es el amianto o asbesto, roca fibrosa cuyas principales propiedades son la elasticidad e incombustibilidad.

La composición de las mezclas destinadas a la construcción de estructuras o elementos estructurales deberá estudiarse previamente, con el fin de asegurar que sea capaz de proporcionar hormigones cuyas características mecánicas, reológicas y de durabilidad satisfagan las exigencias del proyecto. Tales estudios se realizarán teniendo en cuenta las condiciones de la obra real y la aplicación en paneles prefabricados de hormigón.

### **1.1.- Aspectos generales de los paneles prefabricados de hormigón.**

Se conoce como **prefabricado** al sistema constructivo basado en el diseño, producción de componentes y subsistemas elaborados en serie en una fábrica fuera de su ubicación final y que posteriormente, tras una fase de montaje simple, precisa y no laboriosa, conforman el todo o una parte de un edificio o construcción [Aguiló Alonso, M., et al (1974). **Prefabricación: Teoría y práctica. Editores Técnicos Asociados, Barcelona.**]. Es decir, un edificio, panel, componente, etc, se considera que es prefabricado cuando las operaciones que precisa en el terreno son esencialmente de montaje y no de elaboración propiamente dicha.

Un buen indicador del grado de prefabricación, en el caso particular de un edificio, es la cantidad de residuos generados en obra; a mayor cantidad de escombros y suciedad, menor índice de prefabricación presentará el inmueble.

Los paneles prefabricados de hormigón son planchas prismáticas, de secciones principalmente rectangulares, que se conforman, arman, moldean, hormigonan y curan en una planta o fábrica para luego ser enviados al campo de instalación, donde actuarán como cerramientos de construcciones o tabiques divisorios de las mismas.

Los paneles prefabricados de hormigón constituyen una alternativa a los tradicionales hormigones frescos encofrados y obras de mampostería que deben ser ejecutadas en el destino final de construcción. Las principales ventajas que supone su aplicación como

cerramiento de un edificio, son la facilidad y rapidez de montaje, la resistencia, la calidad final del producto y su versatilidad de acabados. En general, los paneles de cerramiento permiten brindar mejores prestaciones que los sistemas tradicionales en un tiempo mucho más reducido y con acabados impecables.

Dentro de los sistemas constructivos en los que se utilizan paneles prefabricados de hormigón merecen particular atención los empleados en la confección de fachadas. Este sistema consiste en la formación de la hoja exterior de una fachada a base de paneles prefabricados de hormigón, con acabados más o menos arquitectónicos. Los paneles prefabricados se fijan a la estructura portante del edificio mediante diferentes sistemas de fijación mecánica.

Los paneles prefabricados de hormigón suelen ser autoportantes y no suelen participar en la transmisión de cargas del edificio. Dichos paneles, por lo general, se diseñan, calculan y fabrican a medida para cada caso particular, adaptándose al proyecto.

En la siguiente imagen, cortesía de Prainsa y que corresponde a una nave del Polígono “La Mejostilla” de Cáceres, se muestra el empleo de paneles prefabricado de hormigón con capa de aislante interior como componentes para la confección de fachadas.



Hay múltiples criterios de clasificación, y de diversa complejidad, para los paneles prefabricados. Tal vez la clasificación más simple es aquella que los agrupa en función de su peso y dimensiones, distinguiendo entre prefabricados livianos (cuyo peso permite la

manipulación manual), semipesados (de hasta 500 kg) y pesados (con pesos superiores a 500 kg y cuyo manejo requiere de la utilización de grúas de gran porte).

Otro criterio de clasificación es la forma. Atendiendo a ésta, se puede distinguir entre bloques, paneles y elementos lineales esbeltos.

También pueden clasificarse por su aspecto exterior y acabado, variando desde lisos a nervados, ranurados e incluso imitando motivos vegetales.

Podría hablarse también de paneles prefabricados con o sin aislamiento térmico, autoportantes o no portantes, cerrados o abiertos, macizos o multicapa, etc.

Las principales ventajas que presentan los paneles prefabricados de hormigón frente al trabajo *in situ* se resumen en que presentan grandes posibilidades plásticas (formas casi ilimitadas, diferentes acabados, etc.); son elementos con un control de calidad elevado al ser evaluados en fábrica; en general presentan buenas características de aislamiento térmico y acústico; son resistentes frente al fuego. Además, se trata de un producto con una puesta en obra rápida, bajos costes de mantenimiento y gran durabilidad.

Entre los inconvenientes que presentan destacan las dificultades de transporte, almacenamiento y manipulación, carácter monolítico, peso elevado y gran volumen.

## **1.2.- Descripción de los componentes de los paneles prefabricados de hormigón**

A continuación se realiza una breve descripción de los principales componentes que entran a formar parte de la formulación de los paneles prefabricados de hormigón. Tales componentes son el cemento, los áridos, el agua, y una amplia variedad de aditivos.

### **1.2.1.- Cemento**

El cemento es el aglomerante hidráulico por excelencia y constituye uno de los ligantes más antiguos empleado por el hombre. Su nombre proviene del latín *caementum*, que quiere decir argamasa.

**Los cementos naturales** provienen de la cocción a unos 1000°C de margas naturales (mezclas de génesis sedimentaria que contienen calizas y minerales de la arcilla en diferentes proporciones). En función de su riqueza en sílice y alúmina este proceso de cocción originará productos diferentes. Son irregulares en su composición y se emplean generalmente para la construcción y restauración de viviendas antiguas.

**Los cementos artificiales**, que son los que se emplearán en este estudio, provienen de la combinación de minerales de la arcilla y rocas calizas en proporciones muy concretas, molidas a diámetros, en general, inferiores a 60 mm, y calcinadas a unos 1500°C, que después serán trituradas y constituirán lo que se conoce como clínker. La clínkerización es la parte más importante del proceso por las reacciones químicas que en ella se producen. Al clínker se le pueden introducir algunos aditivos, como yeso, para controlar la velocidad del fraguado, compuestos de aluminio para la formación de silicoaluminatos, hierro, inertes, etc. El producto sufre un enfriado relativamente brusco al salir del horno y es finamente molido, constituyendo lo que conocemos como cemento.

Entre los cementos artificiales que, potencialmente, podían ser empleados en este estudio se pueden distinguir los siguientes:

- Los cementos portland tipo I, así definidos por su composición, permiten conseguir altas resistencias. Tendrán pequeñas adiciones de yeso (inferiores al 3%) para regular su fraguado y muy poca, o ninguna, adición de inertes.
- Los cementos SR o sulforresistentes, se pretenden emplear en aquellas mezclas en las que el corcho será tratado con sulfatos para su protección bacteriológica.
- Los cementos blancos de alta y baja resistencia, más pobres en hierro y más ricos en cal, que se emplearán en el caso de que se persigan principalmente resultados estéticos.

Estudios previos llevaron a descartar el empleo de cementos sulforresistentes y blancos al observar que no hacían ninguna aportación adicional a las características de los productos que se obtenían con el cemento tipo I.

### 1.2.2.- Áridos

Por áridos se entienden los componentes minerales naturales, generalmente granulados de forma natural o artificial, que acaban integrándose, junto con el cemento, en el aglomerado conocido como mortero u hormigón. Estos áridos aportan al hormigón buenas propiedades mecánicas con las ventajas adicionales de un bajo precio con respecto al resto de los componentes y una fácil disponibilidad geográfica.

Los áridos pueden ser:

**Áridos naturales:** cuando proceden de fuentes naturales, sin más transformación que las mecánicas de lavado, cribado y clasificado.

Se clasifican según:

Su composición (por la familia petrológica de procedencia): a su vez, y de manera simplificada, se puede distinguir entre:

- ígneos y metamórficos
- calizos
- silíceos

El proceso mecánico que han experimentado para su suministro y uso:

- de machaqueo: obtenidos por desintegración artificial mediante trituración en molinos de mandíbulas, barras, bolas, etc. con superficies más o menos rugosas según el material de origen y aristas vivas en general.
- rodados: de diferentes diámetros, con una génesis natural producto de la erosión y desintegración natural de las rocas originales. Son, en general, más o menos redondeados con superficies lisas pulidas y sin aristas vivas

**Áridos artificiales:** Agregados desarrollados a partir de materias primas que sufren una transformación mecánica, térmica, química...

Se clasifican según el proceso de obtención. En su designación debe figurar siempre una referencia a éste:

- Arcillas expandidas
  
- Escorias siderúrgicas (se comprobará previamente que no contienen silicatos inestables ni compuestos ferrosos).
  
- Vidrios triturados
  
- Otros productos como corcho, NFU, etc.

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

En cualquier caso, el suministrador de los áridos artificiales garantizará documentalmente el cumplimiento de las normas específicas que afectan a sus condiciones físico-químicas, físico-mecánicas, dimensionales y morfológicas, etc.

Cuando no se tengan antecedentes sobre la naturaleza de los áridos artificiales disponibles, o se vayan a emplear para otras aplicaciones distintas de las ya sancionadas por la práctica, se realizarán ensayos de identificación mediante análisis mineralógicos, petrográficos, físicos o químicos, según interese o recomiende la normativa.

Todos los áridos deben ser transportados y acopiados de manera que se evite su segregación, contaminación, o pérdida de homogeneidad, debiendo mantener las características propias de cada una de sus fracciones hasta su incorporación a la mezcla.

#### **Áridos empleados en el estudio.**

En este caso, fundamentalmente, se tratará de:

- arenas finas sedimentarias, prácticamente silíceas, mezcla de árido rodado y triturado, procedentes de gravera propiedad de General de Áridos, en el río Guadiana, y

- *filler* calcáreo micronizado, también llamado impalpable por su finura de molido, procedente de Taljedi S.A. (Gilena, Sevilla).

Su misión será la de aportar resistencia y una reología determinada a las mezclas.

### **Designación y nomenclatura de los áridos**

Para designar los áridos se utiliza la nomenclatura d/D – IL - N donde:

- d/D es la *Fracción granulométrica*, comprendida entre un tamaño mínimo, d, y un tamaño máximo, D, en mm.
- IL es la *Forma de presentación*: R, rodado; T, triturado (de machaqueo); M, mezcla.
- N es la *naturaleza del árido*: C, calizo; S, silíceo; G, granito; O, ofita; B, basalto; D, dolomítico; Q, traquita; I, fonolita; V, varios; A, artificial; R, reciclado.

Generalmente en los proyectos, a efectos de la especificación del hormigón, es necesario únicamente establecer para el árido su tamaño máximo en mm, (TM). En este caso, además, se especificará el empleo de árido artificial (corcho) y su porcentaje.

### **1.2.3.- Agua**

El agua que se añade a la mezcla, junto con los demás componentes del hormigón, tiene las siguientes misiones:

- Hidratar los componentes activos del cemento.
- Actuar como lubricante haciendo posible que la masa sea trabajable.
- Crear espacio en la pasta para los productos resultantes de la hidratación del cemento.

Podríamos diferenciar dos tipos principales:

**Agua de amasado:** es el agua que participa en las reacciones de hidratación del cemento y además confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra.

La cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo estrictamente necesario, ya que el agua en exceso se evapora y crea una serie de huecos intercomunicados en el hormigón que disminuyen su resistencia. La presencia de esos poros, además, favorece la penetración de agentes externos que pueden afectar a su durabilidad.

**Agua de curado:** es el agua superficial que se añade para compensar las pérdidas por evaporación. En la actualidad, cuando se hace necesario, se suele proceder al uso de productos de curado comercializados, que actúan como una película que impide la deshidratación superficial sin aporte de sustancias nocivas a la mezcla de hormigón.

Para desempeñar eficazmente su función, tanto el agua de amasado como la de curado deben ser aptas en términos de pH, concentración de sales, etc... tal como viene regulado por diversas normas UNE.

En definitiva, 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.

En la fabricación de las muestras de hormigón de este estudio, el agua procederá de una planta de tratamiento por ósmosis inversa, para evitar contaminaciones de sales que alteren los resultados.

#### **1.2.4.- Aditivos**

En los morteros y hormigones que se prepararán, entenderemos por aditivo cualquier compuesto químico que, incorporado a la mezcla, favorezca la disminución de la relación agua:cemento y la reología concreta que se busque en cada momento. Con este fin, se emplearán aditivos de distintas casas comerciales.

En primer lugar se emplearán aireantes, para conseguir tixotropía, durabilidad, menor densidad, etc. También se utilizarán superfluidificantes reductores de agua (tanto de última generación en base a policarboxilatos, que basan su acción en la repulsión electrostática de las partículas de cemento rebajando el rozamiento entre las mismas, como de primeros estadios de desarrollo de los mismos, de base melamina o naftaleno) para conseguir mejor plasticidad de las mezclas con la menor relación agua:cemento.

En un principio se barajó la posibilidad de emplear aditivos sulfatados, para minimizar la reacción bacteriológica del corcho, aunque finalmente se desestimó su uso valorado en conjunto por los efectos adversos que provocaría en el hormigón sin aportar nada.

#### **1.2.5.- Fibras**

La utilización de materiales compuestos de base fibra en la industria de la edificación y la construcción ha experimentado en estos últimos años un crecimiento importante a nivel mundial, que se ve reflejado en las numerosas aplicaciones que se encuentran hoy día en servicio [1] [2] [3] [4].

Las fibras son materiales ligeros, lo que facilita su manipulación y transporte. Además, los volúmenes empleados de las mismas por m<sup>3</sup> de producto, las hacen fácilmente utilizables.

Una de las fibras ampliamente utilizadas en este tipo de procesos es la fibra de vidrio. Se trata de un material obtenido mediante extrusión o centrifugado del vidrio fundido que se utiliza como aislante térmico y acústico y también como refuerzo estructural de otros materiales. Entre sus propiedades destacan que es incombustible, no produce gases tóxicos, es imputrescible, liviana, posee excelentes propiedades como aislante térmico, es inerte a muchas sustancias, incluyendo los ácidos, muestra una gran maleabilidad y, sobre todo, es altamente resistente a la tracción. Muchas de estas características son compartidas con otros tipos de fibras como las fibras de polipropileno, también ampliamente empleadas en la construcción.

Un aspecto relevante para conseguir prestaciones ideales en una fibra es su coste. En este sentido la fibra de vidrio es el material más prometedor ya que las fibras de carbono y aramida, aunque con propiedades superiores, presentan unos costes difícilmente competitivos con los materiales tradicionales.

Conviene tener presente que si la rigidez es el criterio de diseño, la fibra de carbono va a ser siempre un sistema a considerar. Ahora bien, si el criterio es la resistencia, la fibra de vidrio siempre va a presentar una ratio resistencia-coste superior al resto de las fibras comercialmente disponibles.

Otro asunto de gran importancia es la compatibilidad de la fibra con el hormigón en el caso de que se emplee este material como matriz. La fibra de vidrio más empleada en usos masivos, la denominada tipo E, no presenta un buen comportamiento a largo plazo en hormigones, ya que es susceptible de ser atacada por los álcalis del hormigón. Sin embargo, cuando se emplea matriz orgánica, el conocido vidrio E es un sistema altamente eficiente.

Por otra parte, cuando se trata de reforzar una matriz cementítica, es cuando se puede innovar y aplicar la fibra de vidrio AR, mucho menos conocida y utilizada que la anterior, pero que no es atacada por los álcalis del hormigón debido a la ausencia de boro en su formulación.

### **1.2.6.- Corcho**

El corcho es un material natural, de estructura celular, irreproducible artificialmente por reacción química. Fue el primer tejido vegetal que se observó a través de un microscopio hace ya más de 300 años por Robert Hooke.

Se acepta que la mayoría de las células del corcho se encuentran dispuestas en hiladas radiales. Las células muestran una geometría que se corresponde con un poliedro irregular de 14 caras, oscilando sus dimensiones entre 10 y 70  $\mu\text{m}$ .

La membrana intercelular es de una extraordinaria complejidad, teniendo cinco laminillas de diferente naturaleza química: celulósica, que da tenacidad y resistencia al conjunto; suberosa, que le da la resistencia química, durabilidad e impermeabilidad; y lignificada, que le da rigidez.

Esta curiosa estructura intercelular es la que hace sumamente difícil, en condiciones normales, el flujo de líquidos y gases entre las diferentes capas de corcho. Del mismo modo, esta estructura celular también le proporciona la ligereza (0,12 a 0,25  $\text{t/m}^3$ ), elasticidad (recupera su forma inicial después de estar sometido a presiones de 90 MPa), compresibilidad (módulo de Poisson nulo, resistiendo la compresión sin dilatación lateral, siendo su punto de rotura a compresión comprendido entre 0,2 y 0,7 MPa, impermeabilidad (prácticamente no presenta capilaridad), capacidad de aislamiento térmico, vibratorio y acústico (hasta el 60% en superficie), con alta resistencia al desgaste, retardador del fuego (clasificado como M2, combustible y difícilmente inflamable) y con alta durabilidad.

En este estudio, partiendo de subproductos de corcho, se trabajará con la densidad aparente.

### **1.3.- Proceso de fabricación de los paneles prefabricados de hormigón**

El proceso de fabricación del hormigón para paneles prefabricados conlleva una serie de requisitos como son cualificación de los operarios, dirección experimentada y exhaustivo control de calidad.

Los métodos de hormigonado y compactación serán aceptados si éstos producen un hormigón de calidad específica, homogéneo y resistente.

Las etapas del proceso de fabricación se describen a continuación de forma somera.

#### **1.3.1.- Preparación del molde.**

El proceso de fabricación se inicia con la limpieza y preparación de los moldes. Seguidamente, se impregnan los mismos con un desencoformante. Los requisitos necesarios que deben reunir los moldes empleados en la fabricación de paneles de hormigón son rigidez; compatibilidad de los materiales del molde con el hormigón; volumen estable del molde en las sucesivas aplicaciones; fácil manipulación; baja adherencia entre el molde y hormigón; fácil limpieza; y posibilidad de reutilización en sucesivas puestas.

#### **1.3.2.- Dosificado, hormigonado y compactación del hormigón.**

En primer se plantea una hipótesis teórica a partir de los datos disponibles acerca de las materias primas a emplear. Tras ello se realizarán ensayos con dosificaciones de prueba hasta conseguir la dosificación ideal.

En todo momento se procurará que el contenido de agua permanezca tan constante y bajo en la relación agua:cemento como sea posible y permita la reología necesaria durante la fabricación.

El hormigón se someterá a vibración para asegurar una compactación adecuada, eliminación del aire ocluido, salvo en el caso de que se utilice hormigón autocompactante (HAC). El principal objetivo de la compactación del hormigón es obtener un producto denso y homogéneo con superficies agradables y libres de imperfecciones.

Es necesaria la mezcla homogénea de los materiales, así como la descarga de la misma de forma progresiva y cuidadosa para evitar la segregación y conseguir un buen producto final.

### **1.3.3.- Adición de materiales aislantes y procesos de acabado superficial.**

Los paneles prefabricados con aislamiento intermedio se pueden asimilar a un sándwich donde, entre las capas exteriores de hormigón convencional, se coloca un material aislante de diferentes composiciones y espesores en función de los valores objetivos deseados.

Los acabados superficiales de los paneles serán uniformes y estarán de acuerdo con los límites establecidos por el proyectista. Existen muchos tratamientos superficiales, tan diversos como el chorreado con arena, tratamiento con ácido, trabajo con matrices de caucho, adición de colorante de masa y picados mecánicos. Todos ellos, en general, se ejecutan bajo pedido y deberán ser tenidos en cuenta para el dimensionamiento de las diferentes capas

### **1.3.4.- Curado.**

Se entiende por curado el espacio temporal y los procedimientos empleados con el objetivo de conseguir que el hormigón alcance su resistencia de uso. Además, los procedimientos de curado buscarán reducir cualquier imperfección en el aspecto, tales como la falta de uniformidad de color, manchas por concentraciones salinas o fisuras superficiales de retracción.

En todos los procedimientos de curado se deberá tener en cuenta que el hormigón se encuentra en un estado reoplástico que exige la retención de humedad adecuada para permitir la hidratación total del cemento e impedir cualquier tipo de deshidratación, que conllevaría la aparición de fisuras y defectos.

### **1.3.5.- Desmoldeo.**

El desmoldeo está estrechamente relacionado con el tipo de molde empleado. Existen moldes fijos, mesas abatibles, moldes verticales de librillo e, incluso, hay moldes que requieren el volteo de las capas para la ejecución de la pieza (doble pared).

Todos ellos tienen en común que la manipulación final de las piezas se llevará a cabo mediante puentes grúa o cualquier otro elemento de elevación, eslingas y/o cadenas para su anclaje y

diferentes tipos de sistemas embutidos en el hormigón, que harán de nexo de unión entre la pieza y los sistemas de manipulación y desmoldeo.

### **1.3.6.- Almacenamiento.**

Los paneles deben ser colocados en la posición más parecida a la de utilización, para la que han sido calculados, con el fin de evitar que otros esfuerzos diferentes de los propios de su diseño provoquen la aparición de fisuras u otros defectos. En paneles con dobles capas es muy importante tener en cuenta su posición respecto al sol, ya que la irradiación diferencial de ambas capas provocará esfuerzos que llevarán a deformaciones indeseadas en las piezas.

### **1.4.- Productos naturales como aditivos del hormigón.**

La búsqueda de productos alternativos, asequibles y sostenibles es una constante a nivel mundial. La concienciación en lo relativo los problemas medioambientales está ganando terreno en los últimos años. Conceptos como reutilización, reciclaje y ahorro se inculcan a los niños desde una edad muy temprana.

La actual coyuntura económica mundial también exige contención y se tiene muy en cuenta que los nuevos productos que entran al mercado sean asequibles y sostenibles. Sin embargo, la calidad de estos productos también debe garantizarse mediante controles estrictos.

En definitiva, asequibilidad, sostenibilidad y calidad son, por lo tanto, los tres vectores principales que deben dictar el diseño de un nuevo producto. El cumplimiento de estos tres requisitos supone en la actualidad un gran desafío y está recibiendo mucha atención por parte de los gobierno, de la sociedad en general y de la comunidad científica en particular [1], [2], [3]

En el sector de la construcción se han aplicado una gran variedad de productos basados en diferentes materiales de partida de naturaleza orgánica. Quizás los más empleados han sido la madera, los subproductos de la industria maderera, el corcho y los derivados de éste. Sin embargo, diversas prácticas agrícolas productos también se han reportado como sea posible prima orgánica materiales de construcción. Este tipo de materiales se plantean como una alternativa a otros productos comúnmente empleados, tales como la arcilla expandida o las partículas de poliestireno expandido (EPS) [4].

Desde hace varias décadas se viene investigando en relación con el aligeramiento del hormigón. En este sentido, cabe destacar que se han empleado una amplia variedad de aditivos, tanto de naturaleza inorgánica (tales como cenizas volantes, arcilla expandida y pizarra expandida, vermiculita y perlita) como de naturaleza orgánica (serrín, virutas de madera, turba, cáscara de arroz, fibras de coco o yute). De ellos, el empleo de serrín y madera no tuvo éxito, posiblemente debido a la presencia de sustancias solubles tales como carbohidratos, taninos y ciertos aceites aromáticos que, pueden llegar a retrasar o incluso impedir por completo el fraguado del cemento [5]. Lo mismo cabe decir de la turba. Sin embargo, ya desde hace tiempo se obtuvieron mejores resultados en el caso de la cáscara de arroz, las fibras de coco y el yute [6] [7].

Por otra parte, el consumo de aditivos de todo tipo ha venido aumentando en los últimos años en muchos países (y principalmente en aquellos con una economía emergente) a un ritmo muy superior al que podría atribuirse a la tasa de crecimiento de su economía o a la expansión de sus industrias de la construcción.

El uso de aditivos ligeros como parte de la formulación del hormigón presenta muchos aspectos positivos. Por ejemplo, la disminución en la densidad del hormigón que conlleva la introducción de este tipo de aditivos permite reducir el peso de las estructuras, el tamaño de las cimentaciones y las dimensiones de columnas, losas y vigas. El resultado es una mayor disponibilidad de espacio en los edificios. Los costes de transporte y manufactura también se ven reducidos. Además, el bajo coeficiente de transferencia de calor de estos hormigones proporciona un mayor aislamiento térmico y puede mejorar la resistencia al fuego.

Existen dos tipos de agregados de baja densidad para su uso en hormigón aligerado: los aditivos naturales (piedra pómez, diatomita, cenizas volcánicas, etc) y los aditivos artificiales (perlita expandida, pizarra, arcilla, pizarra, vidrio, microsferas huecas, poliestireno expandido u otros materiales poliméricos, gránulos de plástico, etc.).

Los aditivos artificiales presentan la desventaja de su elevado coste, mientras que los aditivos naturales pueden perder en competitividad si la fuente de producto se sitúa a una distancia considerable del lugar donde se emplearán, puesto que los costes de transporte podrían llegar a ser muy elevados. Además, la continua extracción de aditivos naturales puede venir acompañada de graves problemas ambientales, llegando a menudo a generar un deterioro irremediable del ecosistema. Frente a esta realidad, los residuos industriales se presentan

como una opción viable para sustituir a los aditivos naturales y artificiales, dotando además de un valor añadido a tales residuos. Así, en los últimos años se han empleado con este fin diversos residuos industriales como por ejemplo escorias de alto horno [8], residuos de espuma de poliuretano [9], polvo de ladrillo [10], cenizas de incineradores [11], neumáticos fuera de uso [12] [13], residuos plásticos [14] [15] [16] [17], cenizas de residuos sólidos urbanos [18], residuos de plantas generadoras de electricidad [19] o distintos subproductos agrícolas incluyendo bagazo, cereales, paja, tallos de maíz, mazorca de maíz, tallos de algodón, kenaf, cascarilla de arroz, paja de arroz, cáscaras y tallos de girasol, tallos de plátano, coco o bambú [20], [21].

### 1.5.- Empleo del corcho en la formulación de hormigones.

El corcho es un material celular ligero extraído de la corteza del alcornoque (*Quercus suber*). Los componentes químicos principales de corcho son suberina (40%), lignina (20-22%), hemicelulosa (11%), celulosa (9%) y otros (15-20%) [22], [23]. Debido a su composición única y estructura celular, el corcho presenta una baja densidad, baja conductividad térmica, buen coeficiente de absorción de ruido y resistencia al agua.

Los principales países productores son Portugal, España, Argelia y, a menor escala, en Marruecos, Túnez, Italia y Francia. La Tabla 1.1 muestra la producción anual y la superficie cultivada de alcornoque en dichos países [24].

Tabla 1.1.- Producción anual y superficie cultivada de alcornoque en los principales países productores de corcho

País	Superficie cultivada (ha)	% de la superficie cultivada mundial	Producción (1000 t)	% de la producción mundial
Portugal	725000	33	175	52
España	510000	23	110	32
Italia	225000	10	20	6
Francia	22000	1	5	1
Marruecos	198000	9	15	4
Argelia	460000	21	6	2

País	Superficie cultivada (ha)	% de la superficie cultivada mundial	Producción (1000 t)	% de la producción mundial
Túnez	60000	3	9	3
Total	2200000	100	340	100

Como puede verse, la producción mundial de corcho se eleva hasta las 340.000 toneladas al año, siendo la superficie cultivada de aproximadamente 2,2 millones de hectáreas. Actualmente, el corcho tiene muy diversas aplicaciones, incluyendo tapones de botellas, suelos, aislante acústico e, incluso, en la industria aeronáutica [25]. La Tabla 1.2 resume los principales usos del corcho y el beneficio que generan.

A la vista de la Tabla 1.2 se aprecia que el mayor beneficio se obtiene en la fabricación de tapones de corcho, y es este sector industrial el que transforma la mayor parte de la producción mundial anual de corcho.

Tabla 1.2.- Valor de los principales productos del corcho generados anualmente

Sector industrial	Valor en M€
Tapones de botella	1000
Recubrimiento de suelos y paredes	300
Corcho aglomerado expandido	100
Otros	100
Total	1500

Se estima que, del total de corcho que se dedica a este fin, el 75% se desecha como residuos. Parte de estos residuos se muelen y el producto resultante de ese proceso se emplea para la preparación de paneles que se usarán en la construcción. Sin embargo, una gran parte de los residuos (20-25% en peso, es decir, entre 68000 y 85000 toneladas) sigue siendo infrutilizada debido a que los gránulos poseen una elevada densidad o son de dimensiones muy pequeñas, o incluso ambas cosas a la vez [22].

En el contexto de los materiales de construcción, Hernández-Olivares et al. [26] estudiaron la compatibilidad entre corcho y yeso y analizaron la viabilidad de preparar materiales compuestos corcho-yeso. Sus resultados indican que los materiales compuestos corcho-yeso podrían ser potencialmente utilizados como paredes de partición debido a sus propiedades de aislamiento térmico y acústico.

Inicialmente se pensó en incluir corcho en la formulación del hormigón con el fin de aligerarlo [27]. Investigaciones más recientes han puesto de manifiesto que la incorporación de corcho al hormigón mejora su resistencia térmica, pero va en detrimento de sus propiedades mecánicas [23], [28] [29]. Debido a su estructura celular, el corcho presenta una baja densidad y un alto contenido de gas ocluido, lo que contribuye a una baja conductividad térmica.

Las propiedades mecánicas de las mezclas de cemento-corcho no sólo se controlan por la baja densidad del corcho, sino también en virtud del efecto de la interacción de los productos de la extracción del corcho en el proceso de hidratación del cemento. Karade et al. [22] informó que aunque la incorporación de gránulos de corcho de diámetro mayor de 2-3 mm reduce la resistencia a la compresión de las mezclas cemento-corcho, su efecto sobre el proceso de hidratación del cemento es menor que el de gránulos de tamaño más pequeño (<0,2 mm).

Basándose en las propiedades deseables del corcho, Benabdallah et al. [30] estudiaron las propiedades térmicas y estructurales de fibras de corcho empleadas para reforzar plásticos de polipropileno. Sus resultados pusieron de manifiesto la importancia del pretratamiento del corcho. En concreto, este pretratamiento consistió en introducir el corcho en agua hirviendo a durante diferentes tiempos (hasta 3 h), estudiando a continuación las propiedades estructurales y de adhesión de las mezclas plástico-corcho. Castro et al. [31] estudiaron el comportamiento acústico y térmico de bloques de hormigón que contienen corcho. Sus resultados revelaron que la presencia de corcho no sólo hace mejorar el comportamiento térmico de las paredes de bloques de hormigón, sino que también los hace más ligeros y más fáciles de manejar. Además, el estudio puso de manifiesto los beneficios ecológicos del empleo de corcho como constituyente de los bloques de hormigón. De acuerdo con los experimentos de Castro et al. [31], los bloques que contienen corcho reducen la conductividad térmica en un 45% respecto de los bloques fabricados sin corcho y, además, en su proceso de fabricación se ven reducidas las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto al procedimiento convencional.

Dado que el corcho es un recurso renovable, éste se presenta como un material de construcción sostenible. Sin embargo, pocos estudios han examinado el desarrollo microestructural que tiene lugar en este tipo de procesos así como sus consecuencias respecto a la durabilidad a largo plazo del producto final. Branco et al. [32] remplazaron el aire ocluido en la mezcla por gránulos de corcho y evaluaron la durabilidad del material frente a procesos de congelación-descongelación. Estos autores demostraron que el corcho puede mostrar

resistencias aceptables hasta los 28 ciclos de congelación-descongelación. Sin embargo, más allá de esos 28 ciclos tiene lugar un rápido y severo deterioro.

## Bibliografía

- [1] A. 440, *Guide for the design and constructioun of concrete reinforced with FRP bars*, 2003.
  
- [2] A. Miravete, *Nuevos materiales en la construcción*, Zaragoza: Ed. Universidad de Zaragoza, 1996.
  
- [3] A. Miravete, *Materiales compuestos*, Zaragoza: Ed. Universidad de Zaragoza, 2000.
  
- [4] H. Collins, «STRAIN-CORROSION CRACKING OF GRP LAMINATES.,» *Plastic and Rubber materials and applications*, vol. 3, nº 1, pp. 6-10, 1978.
  
- [5] J. Perez-Garcia, B. Lippke, D. Briggs, J. B. Wilson, J. Bowyer y J. Meil, «The environmental performance of renewable building materials in the context of residential construction,» *J Wood Fiber Sci*, vol. 37, pp. 3-17, 2005.
  
- [6] A. Korjenic, V. Petráněk, J. Zach y J. Hroudová, «DEvelopment and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources,» *Energy Build*, vol. 43, pp. 2518-2523, 2011.

- [7] O. Ortiz, F. Castells y G. Sonnemann, «Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA,» *Constr Build Mater*, vol. 23, pp. 28-39, 2009.
- [8] S. Karade, «Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes,» *Constr Build Mater*, vol. 24, nº 8, pp. 1323-1330, 2010.
- [9] D. F. Orchard, *Concrete Technology: Vol. I -Properties of Materials*, Londres: Applied Science, 1973.
- [10] M. Aziz, *Engineering Materials*, Dacca, Bangladesh: Transworld Book Co., 1973.
- [11] F. Slate, «Coconut Fibres in Concrete,» *Engineering Journal of Singapore*, vol. 3, nº 1, pp. 51-54, 1976.
- [12] R. Demirbog y R. Gul, «Production of high strength concrete by use of industrial by-products,» *Building and Environment*, vol. 41, p. 1124–1127, 2006.
- [13] A. Ben Fraj, M. Kismi y P. Mounanga, «Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight,» *Construction and Building Materials*, vol. 24, p. 1069–1077, 2010.
- [14] J. Alduaij, K. Alshaleh, M. Haque y K. Ellaithy, «Lightweight concrete in hot coastal,» *Cem Concr Compos*, vol. 21, nº 5-6, p. 453–458, 1999.
- [15] X. Qiao, B. Ng, M. Tyrer, C. Poon y C. Cheeseman, «Production of lightweight concrete using incinerator bottom ash,» *Constr Build Mater*, vol. 22, nº 4, pp. 473-480, 2008.
- [16] R. Siddique y T. Naik, «Properties of concrete containing scrap tire rubber—an overview,» *Waste Manage*, vol. 24, nº 6, pp. 563-569, 2004.

- [17] A. Khaloo, M. Dehestani y P. Rahmatabadi, «Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles,» *Waste Manage*, vol. 28, nº 12, pp. 2472-2482, 2008.
- [18] S. Kou, G. Lee, C. Poon y W. Lai, «Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes,» *Waste Manage*, vol. 29, nº 2, pp. 621-628, 2009.
- [19] P. Panyakapo y M. Panyakapo, «Reuse of thermosetting plastic waste for lightweight concrete,» *Waste Manage*, vol. 28, nº 9, pp. 1581-1588, 2008.
- [20] Z. Ismail y E. Al-Hashmi, «Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement.,» *Waste Manage*, vol. 28, nº 11, pp. 2041-2047, 2008.
- [21] R. Siddique, J. Khatib y I. Kaur, «Use of recycled plastic in concrete: a review.,» *Waste Manage*, vol. 28, pp. 1835-1852, 2008.
- [22] R. Sidiqqe, «Use of municipal solid waste ash in concrete,» *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, pp. 83-91, 2010.
- [23] I. Anagnostopoulos y V. Stivanakis, «Utilization of lignite power generation residues for the production of lightweight aggregates,» *J Hazard Mater*, vol. 163, nº 1, pp. 329-336, 2009.
- [24] D. Teo, M. Mannan, V. Kurian y C. Ganapathy, «Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): structural bond and durability properties,» *Build Environ*, vol. 42, nº 7, pp. 2614-2621, 2007.
- [25] E. Aamr-Daya, T. Langlet, A. Benazzouk y M. Quéneudec, «Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles: physico-mechanical properties,»

*Cem Concr Compos*, vol. 30, nº 10, pp. 957-963, 2008.

- [26] S. Karade, M. Irle y K. Maher, «Influence of granule properties and concentration on cork-cement compatibility,» *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 64, pp. 281-286, 2006.
- [27] F. Branco, A. Tadeq y C. Reis, «Can cork be used as a concrete aggregate?,» *Int J Hous Sci*, vol. 31, nº 1, pp. 1-11, 2007.
- [28] T. Fonseca y B. Parresol, «A new model for cork weight estimation in Northern Portugal with methodology for construction of confidence intervals,» *Forest Ecology and Management*, vol. 152, nº 1-3, pp. 131-139, 2001.
- [29] L. Gil, «Cork composites: a review,» *Materials*, vol. 2, pp. 776-789, 2009.
- [30] F. Hernandez-Olivares, M. Bollati, M. del Rio y B. Parga-Landa, «Development of cork-gypsum composites for building applications.,» *Constr Build Mater*, vol. 13, pp. 179-186, 1999.
- [31] A. MA, C. Murphy y S. Ramaswamy, «Lightweight concrete using cork granules,» *Int J Lightweight Concr*, vol. 1, nº 1, pp. 29-33, 1979.
- [32] N. Simoes, A. Moreira y F. Branco, «Effect of natural and expanded granulated cork on strength and thermal behaviour of concrete,» de *XXXV IAHS World*, Melbourne, 2007.
- [33] S. Silva, M. Sabino, E. Fernandes, V. Correlo, L. Boesel y R. Reis, «Cork: properties, capabilities, and applications,» *Int Mater Rev*, vol. 50, nº 6, pp. 345-365, 2005.
- [34] R. BenAbdallah, R. Ben Cheik, M. Baklouti, A. Denchev y A. Cunha, «Characterization of composite materials based on PP-cork blends.,» *J Reinf Plast Compos*, vol. 25, pp. 1499-1506, 2006.

- [35] I. Castro, N. Simoes, A. Tadeu y F. Branco, «Acoustic and thermal behaviour of concrete building blocks with cork,» de *6th Dubrovnik conference on sustainable development of energy water and environment systems*, Dubrovnik, Croatia, 2011.
- [36] F. Branco, M. Reis y A. Tadeu, «Experimental evaluation of the durability of cork concrete,» de *XXXV IAHS world congress on housing science*, Melbourne, Australia, 2007.

## CAPÍTULO 2

### OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

## **CAPÍTULO 2.- OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO**

### **1.- OBJETIVOS.**

Los objetivos propuestos para el desarrollo de este trabajo de investigación se pueden resumir en los siguientes:

1. Familiarizar al doctorando con las técnicas y metodologías de trabajo asociadas al método científico así como con el análisis y discusión de datos experimentales.
2. Introducir al doctorando en el uso del diseño estadístico de experimentos como herramienta para averiguar si unos determinados factores influyen en la variable de interés y, si existe influencia de algún factor, cuantificarla.
3. Poner de manifiesto la utilidad del empleo de subproductos de la industria del corcho con vista a su potencial uso para mejorar las propiedades del hormigón.
4. Analizar, mediante el adecuado diseño de experimentos, la influencia que ejercen determinadas variables en las propiedades mecánicas, térmicas y acústicas de los diversos hormigones preparados.

### **2.- PLAN DE TRABAJO.**

Para alcanzar estos objetivos se ha fijado el siguiente plan de trabajo:

1. Selección de los factores que entrarán a formar parte del diseño de experimentos y de los valores superior, central e inferior de tales factores.
2. Diseño estadístico de los experimentos a realizar.
3. Preparación de diferentes muestras de hormigón, controlando cuidadosamente los porcentajes de árido, corcho y carbonato de calcio que entrarán a formar parte de las mismas.

4. Estudio morfológico de las muestras mediante técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.
5. Estudio de la composición de la interfase corcho-cemento mediante microanálisis por espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDX)
6. Determinación de las diferentes propiedades objeto de estudio en este trabajo, a saber, resistencia a flexión y compresión, densidad y coeficientes de transmisión térmica y acústica.
7. Análisis estadístico de los resultados experimentales obtenidos.
8. Discusión de resultados y elaboración de la Memoria de Tesis Doctoral.

# CAPÍTULO 3

## MATERIALES Y MÉTODOS

## **CAPÍTULO 3.- MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se describe el diseño estadístico de experimentos empleado para estudiar la influencia de las variables de trabajo sobre cada una de las variables objetivo. Igualmente se presentan los materiales de partida para la elaboración de las probetas y se describen los procedimientos para la elaboración de las mismas. Por último, se describen también las técnicas analíticas empleadas y los procedimientos de determinación de las diferentes propiedades de las muestras.

### **3.1.- Introducción al diseño de experimentos**

El estudio sistemático y pormenorizado de todo proceso físico implica la aplicación de una metodología que permita identificar qué variables influyen en el desarrollo del mismo y de qué manera afectan a la respuesta esperada. Así, son conocidas las tradicionales técnicas de influencia de variables “paso a paso”, donde se desarrollan series experimentales variando una a una las variables que se quieren estudiar. Esta metodología es útil para la caracterización de procesos en donde las variables se presuponen independientes unas de otras y con una importancia semejante en la respuesta final. Estudiar así un proceso con dos variables y una única respuesta implica asumir:

- De una parte, que las respuestas debidas a la modificación de una variable no se ven influidas por el cambio en otras. Es decir, no hay interacción entre las variables.
- De otra, que los errores experimentales no son acumulativos y se pueden integrar en las conclusiones a modo de “barras de error”, que serán menores cuanto mayor sea el número de replicaciones de cada experimento.

Esta estrategia presenta inconvenientes importantes si no se pueden demostrar las dos premisas anteriores que, por otra parte, difícilmente se confirman en los procesos químicos, biológicos o físicos. De este modo, el procedimiento “paso a paso” no informa sobre cómo un factor interactúa con los otros factores o cómo estas interacciones afectan a la respuesta. Las deficiencias que se observan al utilizar este procedimiento son debidas, en realidad, al hecho de variar únicamente un factor cada vez. Por tanto, si lo que se pretende es evitar este

fenómeno, se deberán modificar varios factores al mismo tiempo. Entre las estrategias empleadas con este planteamiento se encuentra el Diseño Estadístico de Experimentos, abreviadamente en sus siglas inglesas DOE.

### 3.1.1.-El diseño de experimentos (DOE) como estrategia experimental.

Con el empleo del DOE como metodología investigadora se pretenden varios objetivos:

- Establecer claramente cuánto influyen los factores que se analizan, dentro de los límites de trabajo, en la respuesta del proceso objeto de estudio.
- Establecer las posibles interacciones entre ellos desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo.
- Determinar un óptimo lo más real posible dentro de los límites de estudio.

La base teórica del DOE se encuentra en que toda respuesta observada por un experimentador se puede modelizar según la ecuación [3.1]:

$$y_{observada} = y_{real} + \varepsilon \quad [3.1]$$

donde la  $y_{real}$  es el hipotético valor verdadero de la respuesta y  $\varepsilon$  es el error propio de la observación. Este error viene motivado por multitud de factores, muchos de los cuales son desconocidos y no pueden minimizarse, o tienen que ver con aspectos ocultos del proceso: habilidad del experimentador, aspectos no considerados de importancia, errores de medida de la instrumentación, etc.

En este sentido, el DOE se puede definir como una serie de mecanismos y procedimientos matemáticos y estadísticos que ayudan a controlar el error de observación dentro de límites conocidos. Con él se puede programar la experimentación a fin de optimizar el número de experimentos para obtener conclusiones sobre cómo funciona el proceso objeto de estudio.

**3.1.2.- Tipos de DOE.**

Los diseños experimentales son de muy variados tipos, atendiendo principalmente a la precisión con que se analizan las observaciones experimentales y al objeto final de estudio del diseño. Cualitativamente, se pueden clasificar los modelos de diseño de experimentos según la forma de la ecuación resultante de la inferencia estadística. Atendiendo a ésta, se puede hablar de modelos:

- Lineales, aquellos en los que los datos obtenidos se aproximan a una ecuación del tipo 2 (ejemplo con dos factores y una respuesta).

$$y = a_o + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + \varepsilon \quad [3.2]$$

- Cuadráticos o factoriales, aquellos en los que la ecuación inferida es del tipo 3 (tipo 2 más un factor cuadrático).

$$y = a_o + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{11} \cdot x_1^2 + a_{22} \cdot x_2^2 + \varepsilon \quad [3.3]$$

- No lineales, donde entran en juego expresiones como las del tipo 4, 5 ó 6 (lineal sobre lineal, potencial o exponencial).

$$y = \frac{a_o + a_1 \cdot x_1}{1 + a_2 \cdot x_2} + \varepsilon \quad [3.4]$$

$$y = a_1 \cdot x^{a_2} + \varepsilon \quad [3.5]$$

$$y = a_o + a_1 \cdot e^{a_2 x} + \varepsilon \quad [3.6]$$

Teniendo en cuenta el modo de selección de puntos experimentales, los diseños de experimentos presentan un amplio abanico de posibilidades: aleatorizados o no, con replicación o con observación simple, agrupados en bloque o sin agrupar, con bloques completamente aleatorizados o en cuadro latino, con una o varias respuestas, con dos o más niveles de respuesta... Como se observa, la multiplicidad de alternativas es grande.

En el presente trabajo se ha seleccionado un diseño del tipo factorial. La razón fundamental es que la naturaleza del proceso que se quiere estudiar permite el análisis cuantitativo de la variable respuesta y su estudio según la Metodología de Superficies de Respuesta. Para ello, el modelo más apropiado es el factorial de orden 2 (diseño tipo  $2^k$ ).

### **3.1.3.- El diseño factorial $2^k$ .**

Los diseños factoriales, en general, están recomendados para aquellos procesos donde presumiblemente todos los factores de estudio presentan cruces de interacción. Además de permitir la evaluación de dicha interacción, también son eficaces a la hora de establecer la influencia relativa de cada factor incluso en el caso de no interacción. El estudio de cada una de las variables se lleva a cabo con idéntica eficiencia, aunque la observación es conjunta para la variable respuesta.

Los diseños factoriales implican un elevado número de observaciones para el estudio de cualquier proceso, por lo tanto son muy recomendables para el análisis de dos o tres factores en niveles diferentes ( $2^k$  o  $3^k$  respectivamente). El caso que nos ocupa es el primero de los mencionados.

### **3.1.4.- El método de la superficie de respuesta.**

Cuando el proceso que se estudia se puede modelizar como una función continua, usualmente lo que se pretende es determinar qué forma tiene esa función. Dicho de otra manera, la evaluación de la influencia de las variables debe conducir a la modelización de la

función objetivo o respuesta del proceso, de tal modo que puedan estimarse con una aproximación suficiente los puntos singulares de dicha función (máximos y mínimos).

Las superficies de respuesta de estas funciones son habitualmente muy complejas de modelizar si no se determina con precisión el intervalo de estudio. Una vez hecho esto, es posible ajustar los datos experimentales a una función polinómica donde sí se pueden establecer máximos y mínimos en función de las pendientes crecientes o decrecientes.

### 3.1.5.- El diseño central compuesto (CCD).

El diseño central compuesto (CCD en sus siglas inglesas) es un modelo de muestreo de puntos significativos basado en el diseño factorial  $2^k$ . Se emplea cuando modelos más simples (como el diseño de primer orden o lineal) no son adecuados. La función polinómica a la que se ajustan los valores experimentales tiene la forma de la Ecuación [3.7]:

$$y = \beta_o + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ji} \cdot X_j \cdot X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} \cdot X_i^2 \quad [3.7]$$

Gráficamente, este modelo responde a un diseño como los que se muestran en las figuras siguientes:

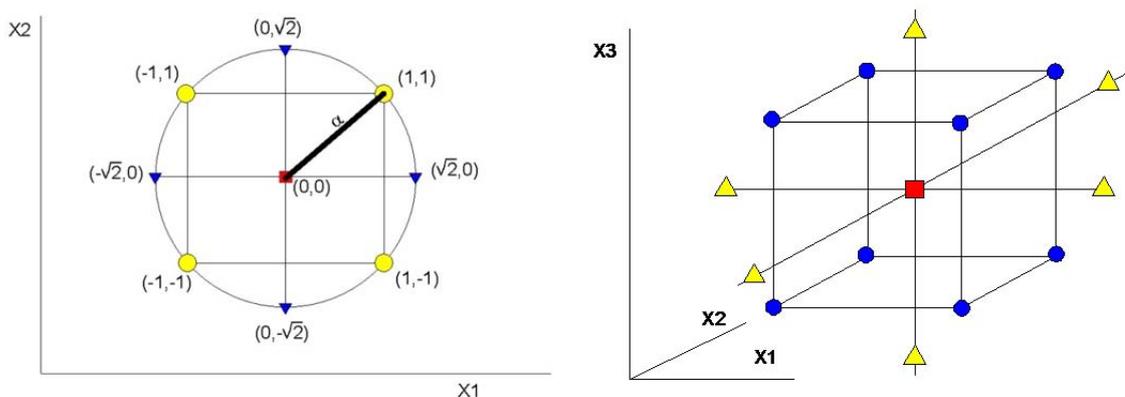


Figura 3.1.- CCD para dos factores (izquierda) y para tres factores (derecha).

El CCD es un tipo de diseño que requiere la acotación de la región de estudio según criterio del experimentador, basándose en conocimiento previo del proceso de estudio. Por otra parte, también es necesario establecer el valor del paso, la diferencia entre los valores cuantitativos que van a definir dicha región.

La parte izquierda de la figura 3.1 muestra los principales parámetros que definen un CCD para dos factores. El caso tridimensional de 3 factores es una generalización del anterior (figura 3.1, derecha). En ambos casos se establecen dos tipos de experimentos, representados bien con un círculo, bien con un triángulo. Los experimentos axiales (triángulos) se corresponden con las condiciones que se sitúan en los ejes de la figura representativa del diseño, mientras que los experimentos factoriales (círculos) son los resultantes de las condiciones en las que todas las variables de estudio toman valores diferentes. Los cuadrados rojos representan el valor central, cuya repetición será la que aporte la estimación del error experimental. Cada punto viene definido por un par de coordenadas normalizadas según codificación y es representativo de un experimento en condiciones dadas.

### **3.1.6.- Ortogonalidad y Rotabilidad.**

La propiedad de la ortogonalidad tiene que ver en el diseño de experimentos con el espacio vectorial generado por los factores de estudio. El diseño será ortogonal si el producto escalar de los vectores representativos del espacio (en el caso de un CCD de dos factores,  $(0,1)$  y  $(1,0)$ ) es igual a 0. Existe, por tanto, una analogía evidente entre la ortogonalidad y perpendicularidad.

En el caso de los diseños experimentales, la ortogonalidad garantiza que los efectos estudiados varíen de igual manera en todas las direcciones en las que varían las variables.

Por otra parte, el criterio de ortogonalidad se ve complementado con la rotabilidad. Si se sigue la analogía gráfica de la figura 3.1 es posible comprender que un parámetro importante para establecer la consistencia interna del modelo viene dado por la distancia  $\alpha$ . Box y Hunter (1957) propusieron la rotabilidad como criterio de bondad para los diseños de segundo orden como el CCD. La rotabilidad garantiza la adecuada distribución de los errores en todas las direcciones del diseño. Un diseño será rotable si cumple que:

$$\alpha = N_F^{1/4} \quad [3.8]$$

donde  $N_F$  es el número de experimentos debidos a los puntos factoriales ( $2^k$ ). Para  $k=2$ ,  $\alpha=1,4142$ ; para  $k=3$ ,  $\alpha=1,68179$ ; para  $k=4$ ,  $\alpha=2$ , etc... Nótese que éste es el paso que se debe usar en la codificación de niveles.

Los criterios de ortogonalidad y rotabilidad afectan a la codificación de niveles y al número de replicaciones centrales, que minimizan el error experimental del proceso. Para un CCD de dos factores, el número total de experimentos vendrá dado por la ecuación [3.9]:

$$N = 2^k + 2 \cdot k + n \quad [3.9]$$

donde  $n$  es el número de réplicas en el centro del diseño.

### 3.1.7.- Metodología Experimental.

De manera práctica, un DOE basado en un CCD ortogonal y rotable (CCORD) se desarrolla de la siguiente manera:

- Elección de variables y niveles de estudio: Basándose en el conocimiento previo del proceso y en el juicio del experimentador, se deben elegir qué variables previsiblemente van a presentar interacción y representan significatividad suficiente como para ser estudiadas. Asimismo, se debe delimitar la región de estudio estableciendo los valores altos y bajos de dichas variables.

La condición de rotabilidad arroja un paso codificado determinado y, por tanto, se puede proceder a la codificación de las variables según valores normalizados donde el valor central queda definido por las coordenadas (0,0). Teniendo esto en cuenta, la ecuación [3.10] proporciona los valores codificados:

$$X_i = \frac{X_{real} - X_{central}}{paso_{real}} \quad [3.10]$$

- Aleatorización de la secuencia de análisis: Con objeto de eliminar los efectos no controlables u ocultos del proceso de estudio, los experimentos codificados deben alterar su orden lógico y reordenarse de manera aleatoria.
- Realización de la experimentación y análisis de la respuesta.

### 3.2.- Preparación de las muestras.

#### 3.2.1.- Selección de productos a ensayo

En una primera fase del proyecto se definieron los materiales base a utilizar para el estudio, tanto por la facilidad de obtención de los mismos, como por su abundancia en la zona. El producto seleccionado fue el residuo de industrias corcheras, dejando otros materiales de rechazo de interés para posteriores investigaciones.

Entre los residuos de las industrias corcheras se escogieron granulados de desecho facilitados por la empresa Eurocork (Almendral, Badajoz). La siguiente imagen muestra las diferentes granulometrías del residuo empleado.



Figura 3.2.- Diferentes granulometrías de corcho empleadas en el estudio.

En primer lugar, y de acuerdo con ensayos experimentales anteriores al inicio de esta investigación, se fabricaron una serie de probetas con dosificaciones ascendentes de residuo de corcho sustituyendo a los áridos gruesos de un mortero patrón de resistencia básica. Así se obtuvieron ejemplares de probetas cúbicas, prismáticas y cilíndricas, para ensayar respectivamente a compresión, flexotracción y transmisión térmica y acústica.

De estos ensayos se pudo concluir también que era fundamental sustituir solamente un tamaño de grano, y no hacer combinaciones de varios de ellos, pues las caídas de resistencias eran mayores. También se infirió que el diámetro ideal de sustitución se situaba en el entorno de 3-6 mm.

### **3.2.2.- Desarrollo de las pruebas preliminares y objetivos**

A pesar de la baja solubilidad en agua de los constituyentes del corcho (polifenoles, ceras, etc), se estimó someter el corcho granulado a humectación durante 24 horas en agua osmotizada. El agua percolada resultante se empleó para amasar diversas familias de probetas, que fueron comparadas con otras muestras patrón fabricadas con agua de ósmosis original, que no había tenido contacto previo con el corcho. Esto permitió confirmar la nula acción del agua sobre las mismas, ya que los resultados de resistencias de ambas familias de probetas eran similares y, por supuesto, dentro de los rangos de variación de estos tipos de hormigón.

Una segunda prueba preliminar consistió en poner en contacto con los residuos del corcho durante varias semanas agua subterránea, comprobando después las propiedades mecánicas del mortero preparado con esta agua, donde el corcho había experimentado un proceso fermentativo. Tales propiedades no sólo se alejaban de los resultados de las muestras patrón, sino que se iban deteriorando con el paso de los días, disminuyendo su resistencia y comenzando a emitir un olor desagradable, que se percibía incluso más claramente en el interior de las muestras ensayadas.



Figura 3.3- Muestras preparadas con agua sometida a fermentación durante 28 días.

Esto llevó a valorar la necesidad de un tratamiento con sulfatos e, incluso, que pudiera llegar a ser necesario en consecuencia amasar con cemento SR. Sin embargo, esta medida no se terminó adoptando porque se encontró una solución alternativa, que se describe a continuación.

Es bien conocida la capacidad de absorción de agua que tiene el corcho. Además, el corcho expulsa progresivamente ese agua durante la realización de los ensayos, lo que impide un adecuado control de la cantidad total de agua de amasado. Esto implica una mayor dificultad en el control de la trabajabilidad y termina alterando la relación agua/cemento y, en consecuencia, las resistencias. Por tanto, se hizo necesario valorar otras opciones, como por ejemplo, pasivar momentáneamente la avidéz del corcho por el agua mediante adición de  $\text{CaCO}_3$ . Este producto, fácilmente disponible en cualquier planta de prefabricados de hormigón, aporta además a la muestra una consistencia menos seca sin necesidad de adicionar agua en demasía (véase figura 3.4).

Como paso previo, se partió de una mezcla con una relación aproximadamente 5/1 de corcho/cemento, junto con un aditivo de primera generación (reductor de agua, plastificante y ligeramente aireante) a fin de mantener una relación agua/cemento lo menor posible y conseguir además una alta tixotropía. Una imagen de estas muestras se ilustra en la figura 3.5.

Precisamente por la tixotropía y aspecto de las muestras así preparadas, esta opción parece ser la más adecuada y el resultado de los ensayos en ese sentido ha sido prometedor, como se verá más adelante.



Figura 3.4- Ensayo de cono de Abrams de consistencia fluida (UNE 83-313-90// -EN 12350-2)

Además, los materiales preparados partiendo de esta mezcla podrían emplearse como relleno interior de panel bicapa o bien en la confección de baldosas para forrado de superficies y paramentos de edificios que deban cumplir con especiales necesidades de aislamiento térmico y acústico y eficiencia energética. De esta forma, se podrían adaptar a la nueva directriz europea sobre eficiencia energética en las viviendas, que ha entrado en vigor en julio de 2013.



Figura 3.5- Muestras preparadas con una relación corcho/cemento blanco (5/1) y adición de aireante.

No obstante, y como una segunda opción, se pretendió preparar una variante resistente, mucho más compacta, que estuviera enriquecida en cemento y además tuviera incorporados otros inertes, tanto silíceos como calizos, para buscar la posibilidad de fabricar un panel aligerado, aislante térmico y acústico, de un solo componente, macizo y de menor espesor que los multicapa. La resistencia a flexotracción se llevó a cabo en un equipo como el de la figura 3.6, que se describirá más adelante.



Figura 3.6- Ensayo a flexotracción (izquierda) de baldosa de muestra y gráfica de rotura (derecha).

En una siguiente etapa se emplearon aditivos de última generación que consiguen una reducción mucho mayor del agua de amasado, además de proporcionar una mayor fluidez a la mezcla, lo que se traduce en una buena trabajabilidad, tal como se aprecia en la figura 3.7.



Figura 3.7- Mezcla preparada con aditivos de última generación (Foto Alberto Escalera)

Sin embargo, el uso de estos aditivos proporciona tal fluidez a la mezcla que aparece un nuevo problema, que no es otro que la flotación del corcho. Para minimizar este problema y conseguir una distribución uniforme de los componentes de la mezcla, se hizo necesario combinar aditivos reductores de agua de última generación y otros aditivos (aireantes–plastificantes), que permitían homogeneizar la mezcla, eso sí, con consistencias plásticas y mayor tixotropía. En la figura 3.8 se puede apreciar, en las secciones de las muestras rotas a flexotracción, la distribución homogénea del corcho y la ausencia de segregación, sea cual sea la proporción de aditivos empleada.



Figura 3.8- Secciones de muestras de distintas composiciones y rotas a flexotracción (Foto Alberto Escalera)

Con una finalidad estética, se emplearon cementos blancos en ambos modelos, procediendo incluso a realizar un ataque superficial para que se apreciara en superficie el aspecto del

corcho empleado. En general, el resultado no fue el idóneo, salvo en el caso en el que se aplicaron tratamientos superficiales (con barnices, geles de sílice, etc). Estas muestras, en un primer estadio, cumplían los objetivos, pero con el paso de los meses fueron deteriorándose y perdiendo esa función estética inicial. Uno de esos tratamientos superficiales se muestra en la figura 3.9.



Figura 3.9- Baldosas con presencia de ataque superficial para dejar al aire los granos de corcho con misión estética y aislante (Foto Alberto Escalera)

Aunque los resultados fueron admisibles, se añadieron fibras de vidrio y/o polipropileno en diferentes proporciones para mejorar las propiedades técnicas de los morteros. Especialmente llamativos fueron los resultados obtenidos en el caso de impacto con un proyectil del calibre 9 mm parabellum. La figura 3.10 muestra el efecto de tal impacto en muestras preparadas con diferente proporción de corcho y fibra.



Figura 3.10. Diferencia en la resistencia a un impacto de proyectil del calibre 9 mm parabellum en muestras con menor (izda) o mayor (dcha) cantidad de corcho y fibra (Foto Alberto Escalera).

Finalmente, se procedió a llevar a cabo las mezclas en diferentes órdenes de adición, siempre buscando la optimización de los componentes en la que luego sería la muestra patrón, base del posterior ensayo estadístico. La figura 3.11 ilustra el proceso de preparación de las muestras.



Figura 3.11- Preparación de las dosificaciones de los materiales por familias completas de muestras (Foto cedida Antonio Ruiz).

Tras los ensayos preliminares se llegó a las conclusiones siguientes:

- Siempre es positiva la adición de aireantes/plastificantes a la mezcla, ya que dan estabilidad al conjunto, permiten la distribución uniforme de sus componentes y aportan tixotropía suficiente como para evitar la flotación del corcho.
- Es fundamental añadir *filler* calizo en la primera fase de la mezcla, ya que inhibe la acción superficial del corcho y su avidez por el agua de amasado,

permitiendo relaciones de agua/cemento menores y, por tanto, resistencias mayores del conjunto.

- No es conveniente combinar granulados de diferentes diámetros. Por el contrario, es recomendable emplear fundamentalmente granulados entre 3 y 6 mm (tal como se recoge en la bibliografía existente al respecto), permitiendo así que el empaquetamiento de las partículas deje intersticios suficientes como para que la pasta de mortero actúe de base de transmisión de los esfuerzos compresivos.

- Es necesario añadir aditivos superfluidificantes de última generación para reducir la relación agua/cemento y conseguir resistencias algo más altas.

- Se requiere añadir siempre fibras de vidrio y/o polipropileno para mejorar el comportamiento físico, especialmente mecánico, del conjunto.

- Es muy conveniente proceder de forma ordenada para favorecer la sinergia de los efectos de todos los aditivos y materias primas, en especial, las referentes a corcho, *filler* y agua.

- No se aprecia fisuración por retracción durante el fraguado, al ser absorbida dicha retracción por la propia elasticidad del corcho.

- El orden de adición del conjunto, así como los tiempos empleados en cada paso será el siguiente:

1. Áridos gruesos, áridos finos y corcho vertidos consecutivamente y sin tiempo de espera entre ellos. Tiempo de mezclado 15".

2. Aproximadamente 1/5 del agua de amasado vertida lentamente.

3. *Filler* (CaCO<sub>3</sub>). Tiempo de mezclado 15".

4. Cemento. Tiempo de mezclado 15".

5. Aproximadamente 3/5 del agua de amasado. Tiempo de mezclado 15".

6. Fibra. Tiempo de amasado 15".
  
7. El 1/5 restante del agua de amasado junto con los aditivos. Tiempo de amasado 120".

### **3.2.3.- Materiales empleados en la preparación de las probetas**

A continuación se describen, brevemente, los distintos materiales empleados en la elaboración de las mezclas que se han ensayado en este estudio.

#### ***Cemento***

A lo largo de este trabajo de investigación se ha empleado el cemento CEM I 52,5R Cemento Portland de CEMENTOS DE ANDALUCÍA, S.L. suministrado por la fábrica que esta compañía tiene en Córdoba. Este cemento se caracteriza por una muy alta resistencia a la compresión y una elevada resistencia inicial. Tiene numerosas y muy variadas aplicaciones, entre las que destacan hormigonado en tiempo frío, hormigón armado, hormigón pretensado (incluidos prefabricados estructurales), otros elementos estructurales prefabricados, hormigón de alta resistencia, hormigón proyectado, hormigón para desencofrado y descimbrado rápido y cimentaciones de hormigón armado.

Sin embargo, a pesar de su versatilidad, este material presenta ciertas restricciones de empleo, como por ejemplo en hormigón en masa o armado en grandes volúmenes, en hormigón seco compactado con rodillo, en bases de carreteras tratadas con cemento, o en hormigones que contienen áridos potencialmente reactivos. Igualmente, no se recomienda su uso en obras que soporten ambientes y/o terrenos agresivos. La figura 3.12 muestra el uso del cemento en obras prefabricadas.



Figura 3.12- Uso del cemento en obras prefabricadas según su catálogo (Foto CIMPOR, Obra Bogaris PRAINSA)

Además, con vistas a su uso hay que tomar ciertas precauciones, tales como no mezclar ni con yeso ni con otro tipo de cemento.

Algunas características de este cemento se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3.1- Algunas propiedades del cemento CEM I 52,5R

Composición	
Clinker	97%
Minoritarios	3%
Especificaciones técnicas	
Pérdida por calcinación	≤5.0%
Residuo insoluble	≤5.0%
Sulfato (SO <sub>3</sub> )	≤4.0%
Cloruros	≤0.1%
Cromo VI soluble en agua (UNE-EN 196-10)	≤0.0002%
Resistencia a la compresión	
2 días	≥30.0 MPa,
28 días	≥52.5 MPa

Tiempo de fraguado:	
(Le Chatelier)	≥45 minutos
	≤720 minutos

**Áridos síliceos**

Todos los áridos síliceos provinieron de la gravera perteneciente a General de Áridos, del grupo PRAINSA, situada en el término municipal de Mérida, en los aledaños de Torremayor, en la Finca “La Piñuela”, a orillas del Guadiana. Todos ellos se caracterizan por no presentar reacción a los álcalis. La figura 3.13 reproduce un informe de laboratorio que pone de manifiesto esto último.

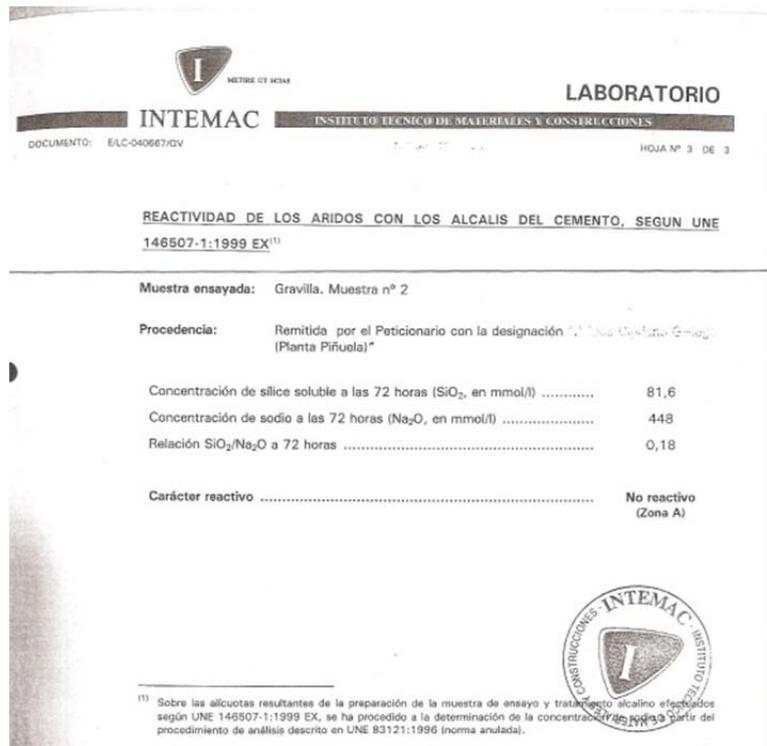


Figura 3.13- Certificado de no reactividad a los álcalis.

En este estudio se han empleado dos áridos silíceos a saber, arena silícea 0/2 natural y arena silícea 0/6 de machaqueo. Las características más importantes de ambas se describen a continuación.

Arena silícea 0/2 natural :

Se trata de una arena con un porcentaje superior al 90% de material silíceo, procedente del cribado y lavado de arenas naturales del río Guadiana, con un coeficiente de forma muy esférico, que le confiere gran trabajabilidad al mortero. La figura 3.14 muestra un análisis granulométrico de los áridos.

PRAINSA CALIDAD					FEC 05-10-00-08-Q02 GRANULOMETRIA ARIDOS 2012 Juan C.XI S. Septiembre 2012							
Indicar Gramos "Peso muestra Húmeda" =		1.000,00		% HUMEDAD	Gramos Pesc. húmeda =		1000		% HUMEDAD			
Indicar Gramos "Peso muestra Seca" =		985,90		1,43	"Gramos Peso M.Seca" =		979,8		2,08			
Material: AF-R0/2 -S-L					Material: AF-R0/2 -S- 13-sep							
TAMICES	PESO	Acum	Reten	%	PESO	Acum	Reten	%	PESO	Acum	Reten	%
	Reten				Reten				Reten			
25	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
20	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
16	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
14	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
12	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
10	0,00		0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	2,00	2,00	0,20	0,20
8	4,00	4,00	0,41	0,41	0,00		0,00	0,00	0,00	2,00	0,00	0,20
6	2,00	6,00	0,21	0,62	1,30	1,30	0,13	0,13	1,00	3,00	0,10	0,31
4	7,10	11,10	0,72	1,13	8,80	8,80	0,90	0,90	4,90	8,90	0,50	0,70
2	6,40	17,50	0,65	1,78	19,70	28,50	2,01	2,91	9,50	16,40	0,96	1,66
1	6,20	23,70	0,63	2,41	13,30	41,80	1,36	4,27	8,50	24,90	0,86	2,52
0,6	59,90	83,60	6,09	8,50	461,30	523,10	49,16	53,43	71,30	96,20	7,21	9,73
0,25	468,70	552,30	47,63	56,13	391,70	914,80	40,01	93,44	480,30	576,50	49,56	58,29
0,125	372,80	924,80	37,86	93,96	55,80	970,60	5,70	99,14	355,50	932,00	35,94	94,23
0,063	47,20	972,00	4,80	98,78	6,80	977,40	0,69	99,84	45,20	977,20	4,57	98,80
Fondo	12,00	984,00	1,22	100,00	1,60	979,00	0,16	100,00	11,90	989,10	1,20	100,00
Lectura superficie arena=	94,00	E.A.V.=	87		Sup.Arena=	95,00	E.A.V.=	90	Sup.Arena=	92,00	E.A.V.=	86
Lectura superficie arcilla=	106,00	M.F.=	1,64		Sup.Arcilla=	106,00	M.F.=	2,54	Sup.Arcilla=	108,00	M.F.=	1,67

Figura 3.14- Análisis granulométricos de la arena silícea 0/2 natural cortesía de ESTARSA, grupo Prainsa

El uso fundamental de esta arena es como potenciador de la fluidez de la mezcla fresca gracias a su coeficiente de forma.

Arena silícea 0/6 de machaqueo:

Es una arena que posee un porcentaje superior al 90% de materiales silíceos. Proviene de la misma terraza aluvial y es el resultado de triturar el material procedente de la extracción ,

hasta que queda reducido al diámetro requerido. Al igual que en el caso anterior, la figura 3.15 reproduce un ensayo granulométrico de este tipo de muestra.

FFQ 05-10-00-09-Q.02 GRANULOMETRIA ARIDOS 2012 Juan C.XLS Septiembre 2012  
 E.A.V. es el valor del equivalente de arena "a vista" basado en la norma UNE 8313

Indicar Gramos "Peso muestra Húmeda" = 1.000,00		% HUMEDAD	
Indicar Gramos "Peso muestra Seca" = 995,80		0,42	
Material: AF-T-0/4-S-L 05-sep			
TAMICES	PESO Reten	Acum	% Acum
26	0,00		0,00
20	0,00		0,00
16	0,00		0,00
14	0,00		0,00
12	0,00		0,00
10	0,00		0,00
8	2,60	2,60	0,26
6	0,50	3,10	0,05
4	75,60	78,70	7,80
2	314,90	393,60	31,67
1	197,10	590,70	19,82
0,5	121,30	712,00	12,20
0,25	98,90	810,90	9,95
0,125	123,50	934,40	12,42
0,063	49,20	983,60	4,95
Fondo	10,60	994,20	1,07
Lectura superficie arena= 90,00		E.A.V.=	96
Lectura superficie arcilla= 94,00		M.F.=	3,64

Gramos Peso M. Húmeda = 1000		% HUMEDAD	
"Gramos Peso M. Seca" = 999,3		0,07	
Material: AF-T-0/4-S-L 13-sep			
PESO Reten	Acum	Reten	% Acum
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
107,00	107,00	10,72	10,72
292,20	399,20	29,27	39,99
195,00	594,20	19,54	59,53
125,40	719,60	12,56	72,09
130,70	850,30	13,09	85,18
115,20	965,50	11,54	96,72
26,00	991,50	2,60	99,33
6,70	998,20	0,67	100,00
Sup. Arena= 84,00		E.A.V.=	91
Sup. Arcilla= 92,00		M.F.=	3,64

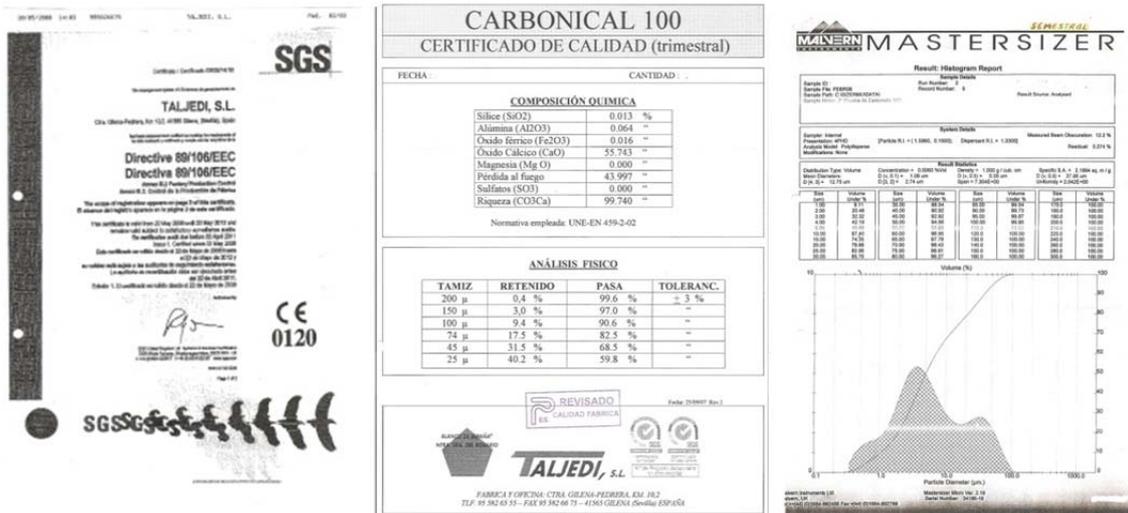
Gramos Peso M. Húmeda = 1000		% HUMEDAD	
"Gramos Peso M. Seca" = 995,8		0,32	
Material: AF-T-0/4-S-L 19-sep			
PESO Reten	Acum	Reten	% Acum
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
0,00		0,00	0,00
71,70	71,70	7,21	7,21
319,10	390,80	32,07	39,28
192,80	583,60	19,38	58,65
126,90	710,50	12,75	71,41
104,40	814,90	10,49	81,90
112,10	927,00	11,27	93,17
55,70	982,70	5,60	98,76
12,30	995,00	1,24	100,00
Sup. Arena= 86,00		E.A.V.=	91
Sup. Arcilla= 94,00		M.F.=	3,62

Figura 3.15- Análisis granulométricos de la arena sílicea 0/6 natural cortesía de ESTARSA, grupo Prainsa

**Áridos calizos**

Se trata de productos abastecidos por la empresa Taljedi (Gilena, Sevilla). Tienen un porcentaje de carbonato de calcio superior al 99% y por su finura de molido se les conoce como *impalpables*.

Se introducen en la formulación con el fin de inhibir la capacidad de absorción de agua por parte del corcho y fluidificar la mezcla por aporte de finos. La figura 3.16 reproduce diversos ensayos realizados a este tipo de áridos.



<p>Campus Universitario Apdo. de correo 135 40071 CACAYES Tto. 927181042, F. FAX 927181041</p>	<b>INFORME DE ENSAYO</b> (Anexo 1.1-PG-24-00) ÁREA DE LABORATORIO : AGUAS	Pág. 2 de 2
	IDENTIFICACIÓN INFORME / MUESTRA: 0076/12. E2	
DETERMINACIÓN DEL RESIDUO SECO UNE 8397:2008		
Contenido total de sustancias solubles (mg/l) <input type="text" value="1"/> <small>Valor sancionado según la EHE es &lt;math&gt;\leq 15\text{g/l}&lt;/math&gt;</small>	Fecha de ensayo:	
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN ION SULFATO UNE 8396:2008		
Contenido en sulfato, $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l) <input type="text" value="7.38"/> <small>Valor sancionado según la EHE es &lt;math&gt;\leq 1\text{g/l}&lt;/math&gt;, excepto para cemento SR cuyo límite es 5g/l</small>	Fecha de ensayo:	
DETERMINACIÓN DE LOS CLORUROS CONTENIDOS EN EL AGUA UTILIZADA PARA LA FABRICACIÓN DE MORTEROS Y HORMIGONES UNE 7178:1960		
Contenido en cloruros en ppm <input type="text" value="7.1"/> El resultado expresado en g/l es 0,0071 <small>El valor sancionado por la EHE es &lt;math&gt;\leq 1\text{g/l}&lt;/math&gt;</small>	Fecha de ensayo:	
DETERMINACIÓN CUALITATIVA DE HIDRATOS DE CARBONO EN AGUAS DE AMASADO PARA HORMIGÓN UNE 7132:1958		
Presencia de sacarosa <input type="text" value="NO"/> <small>El valor sancionado por la EHE es 0</small>	Fecha de ensayo:	
Presencia de sustancia reductoras <input type="text" value="NO"/>		
DETERMINACIÓN DEL pH, MÉTODO POTENCIOMÉTRICO UNE 8392:2008		
pH de la muestra ensayada <input type="text" value="6.8"/> <small>El valor sancionado por la EHE es &gt; 5</small>	Fecha de ensayo:	
DETERMINACIÓN DE LOS ACEITES Y GRASAS CONTENIDOS EN EL AGUA DE AMASADO DE MORTEROS Y HORMIGONES. UNE 7235:1971		
Ensayo Cualitativo <input type="text" value="NO"/> Indica la presencia de aceites y grasas <small>El valor sancionado por la EHE es &lt;math&gt;\leq 15\text{g/l}&lt;/math&gt;</small>	Fecha de ensayo:	

Figura 3.17- Ensayo de agua de pozo previa a tratamiento de osmosis.

**Aditivos líquidos**

En la preparación de las probetas se han empleado diversos aditivos líquidos entre los que se incluyen los siguientes:

Plastificantes/Aireantes:

Existe una amplia variedad de este tipo de compuestos, que son comercializados por diversas compañías. En estos ensayos, en particular, se han empleado los suministrados por las casas Chryso (Chrysoplast) y BASF (Pozzolith). Ambos tienen características similares. La adición de este tipo de compuestos tiene como objetivo incrementar el comportamiento plástico del hormigón, que permita que las partículas ligeras no floten, como ocurriría si los reductores de agua más modernos se emplearan en solitario.

A continuación se presentan las especificaciones indicadas en la ficha técnica de uno de ellos.

#### CHRYSOPLAST ALPHA 12

Plastificante especial para prefabricación ligera.

#### Descripción:

Especialmente proyectado para los hormigones secos que produce la industria de la prefabricación ligera. Es el resultado de una combinación de compuestos orgánicos e inorgánicos, de elevado rendimiento. Ejerce una acción defloculante que permite la completa hidratación del cemento.

Una limitada oclusión de aire permite obtener mayor homogeneidad a los hormigones que carecen de suficiente proporción de finos y mejora ostensiblemente el acabado final de las piezas.

#### Características:

- Naturaleza: líquido.
- Color: amarillento de claro a oscuro
- Densidad : 1,3 g/cm<sup>3</sup> a 20°C
- pH: 7,5 aprox.
- Contenido en cloruros: ~ 20% en masa.

#### Superfluidificantes:

Al igual que en el caso anterior, se emplean los suministrados por las casas BASF (Glenium) y Cryso (Premia). A continuación se detallan las principales propiedades de ambos.

GLENIUM es un aditivo superplastificante/reductor de agua de alta actividad basado en policarboxilatos para aplicaciones en hormigón prefabricado, donde se demande alta resistencia inicial. Posee un excelente poder plastificante y elevadas resistencias iniciales, incluso a dosificaciones bajas.

Características:

- Superplastificante / Reductor de agua de alta actividad.
- Acelerador de endurecimiento.
- Riesgo de disgregación por sobredosificación.
- Líquido turbio amarillento.
- Densidad, 20º C :1,040 ± 0,02 g/cm<sup>3</sup>
- Viscosidad, 20º C Brookfield Sp00/100rpm: < 60 cps.
- pH: 7 ± 1
- Contenido en cloruros: < 0,1 %

CHRYSOFLUID PREMIA 150 es un superplastificante de nueva generación, conforme a la norma UNE EN 934-2, a base de policarboxilatos modificados que produce una fuerte reducción de agua. CHRYSOFLUID PREMIA 150, utilizado en hormigones con una cantidad importante de finos, permite la obtención de una fluidez excepcional que facilita la puesta en obra de hormigones sin vibración (hormigones autocompactables).

Con CHRYSOFLUID PREMIA 150 se consiguen resistencias elevadas a cortas edades y 28 días.

Características:

- Líquido blanco lechoso
- Densidad a 20°C: 1,06 g/cm<sup>3</sup>
- pH: 4,5 aproximadamente
- Contenido en Na<sub>2</sub>O eq.: <1.6%
- Exento de cloruros
- Residuo seco: 30%

**Corcho:**

El uso de esta materia prima es uno de los fundamentos de este estudio. Se emplea en forma de granulado. Algunas de las características de este material se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 3.2.- Resultados de los ensayos de absorción de agua a muestras de corcho a ensayo.

Datos absolutos.

Masa inicial de corcho (kg)	Peso seco al inicio (kg)	PESO SECO (kg)				
		0,75 horas	1,5 horas	3,25 horas	7,5 horas	22,5 horas
30	24,8	46,5	45,2	43,7	40,7	34,3

30	24,8	46,6	45,6	43,6	40,3	34,3
30	24,6	47,8	46,5	44,3	40,7	34,7
30	24,7	48,8	47,5	45,6	41,6	35,5
Media 30	24,7	47,4	46,2	44,3	40,8	34,7

Gentileza de IPROCOR (Fecha de realización del ensayo 04/06/2012)

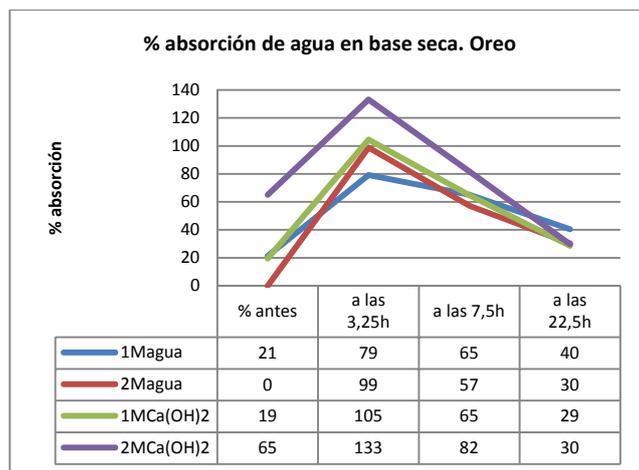
Tabla 3.3.- Resultados de los ensayos de absorción de agua a muestras de corcho a ensayo.

Datos en porcentaje (base seca).

% inicial	% de agua (peso seco al inicio)	% de agua				
		0,75 horas	1,5 horas	3,25 horas	7,5 horas	22,5 horas
21	0,0	87,5	82,3	76,2	64,1	38,3
21	0,0	87,9	83,9	75,8	62,5	38,3
21	0,0	94,3	87,5	78,6	64,1	39,9
21	0,0	97,6	91,5	83,9	67,7	43,1
Media 21	0,0	91,8	86,3	78,6	64,6	39,9

Gentileza de IPROCOR (Fecha de realización del ensayo 04/06/2012)

Es fundamental para el desarrollo de todo el trabajo la valoración de la capacidad de absorción de agua por parte del corcho. En estas tablas se aprecia claramente cómo, en una primera etapa, el corcho capta una muy elevada proporción de agua (hasta un 91,8% de su propio peso por término medio en tan sólo 45 minutos) para posteriormente ir perdiendo esa agua hasta el punto de que a las veintidós horas y media únicamente permanece retenido un 40% aproximadamente del peso. Esta tendencia se ve corroborada gráficamente a la vista de la figura 3.18, en la que se aprecia la evolución de la masa del corcho sumergido en agua a lo largo del periodo de análisis que se acaba de indicar.



Datos gentileza de IPROCOR

Figura 3.18.- Variación de la capacidad de absorción de agua por corcho en función del tiempo.

Tabla 3.4.- Ensayos de granulometría (a), densidad (b) y humedad (c) de la muestra de corcho.

<b>(a) Granulometría</b>		
Luz de tamiz (mm)	Masa retenida (g)	%
5,6	0	0
5,0	9,5	1,0
4,0	332,5	35,4
3,2	577,9	61,5
2,8	17,8	1,9
<2,5	2,2	0,2
<b>TOTAL</b>	<b>940</b>	<b>100,0</b>

Gentileza de IPROCOR  
(Fecha de realización del ensayo 24/04/2012)

<b>(b) Densidad</b>					
Densidad cubo 2 litros			Densidad cubo 2 litros al 8% base húmeda		
Control	Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Peso seco	Peso Húmedo 8%	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	428,4	214,2	354,7	385,6	192,8

<b>(b) Densidad</b>					
<b>Control</b>	<b>Densidad cubo 2 litros</b>		<b>Densidad cubo 2 litros al 8% base húmeda</b>		
	<b>Peso (g)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso seco</b>	<b>Peso Húmedo 8%</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>2</b>	416,0	208,0	347,4	377,6	188,8
<b>3</b>	414,5	207,3	346,1	376,2	188,1
<b>4</b>	410,9	205,5	343,1	372,9	186,5
<b>5</b>	406,4	203,2	339,3	368,9	184,5
<b>6</b>	420,1	210,1	350,8	381,3	190,7
<b>7</b>	414,5	207,3	346,1	376,2	188,1
<b>8</b>	408,9	204,5	341,4	371,1	185,6
<b>9</b>	420,4	210,2	351	381,6	190,8
<b>Media</b>	415,6	207,8	346,7	376,8	188,4
<b>Desv. est.</b>	6,3	3,2	4,7	5,1	2,5

Gentileza de IPROCOR (Fecha de realización del ensayo 24/04/2012)

<b>(c) Humedad</b>			
<b>Peso bandeja (g)</b>	<b>Peso bandeja + grano húmedo (g)</b>	<b>Peso bandeja + grano seco (g)</b>	<b>% base húmeda</b>
157,4	268,3	250	16,5

Gentileza de IPROCOR (Fecha de realización del ensayo 24/04/2012)

Por otra parte, es conocido el hecho de que el corcho contiene polifenoles de bajo peso molecular, así como elagitaninos. Los polifenoles más comúnmente identificados en el corcho son los ácidos gálico, protocatéquico, vanílico, cafeico, ferúlico, eláxico. También pueden extraerse del corcho aldehídos como el coniferaldehído, aldehído sinápico y otros productos tales como cumarinas, aesculetina y escopoletina. Entre los elagitaninos anteriormente citados, los más comunes son las roburinas A y E, la grandinina, vescalagina y castalagina. Por ello, se estimó conveniente realizar un análisis rutinario de extracción de polifenoles y otros compuestos orgánicos utilizando para ello dos disolventes extractivos ampliamente empleados como son el hexano o el agua. Los resultados de este análisis se recogen en la tabla 3.

Tabla 3.5.- Tabla de resultados del ensayo de extracción de polifenoles.

10 g corcho granulado por muestra											
Extraíbles con hexano					Extraíbles con agua						
Muestra	Pm, g	Pm+e, g	Pe, g	P, mg ext/g corcho	Muestra	Pm, g	Pm+e, g	Pe, g	PTe, g	P, mg ext/g corcho	
1	105,993	106,057	0,064	6,4	1	109,514	109,557	0,043			
2	109,926	110,121	0,195	19,5	1	88,904	88,946	0,042	0,132	13,2	
3	113,553	113,633	0,080	8,0		108,213	108,26	0,047			
4	93,858	93,903	0,045	4,5	2	107,394	107,42	0,026			
5	97,533	97,598	0,065	6,5	2	97,528	97,561	0,033	0,097	9,7	
			Media	6,4		107,128	107,166	0,038			
			(Eliminando el punto más alto)		3	106,581	106,647	0,066			
					3	93,844	93,917	0,073	0,200	20	
						105,991	106,052	0,061			
					4	104,146	104,197	0,051			
						87,045	87,111	0,066	0,162	16,2	
						108,064	108,109	0,045			
					5	99,038	99,064	0,026			
						109,928	109,957	0,029	0,084	8,4	
						107,078	107,107	0,029			
									media	11,875	
										(eliminando el punto más alto)	
Polifenoles totales de Granulado de corcho											
Muestra	Archivo UV	Abs C	Galico ppm (25 mL)	Cm ppm	C AcGal ppm	C corcho g/l	EAG/g corcho				
15 g corcho en 77 mL	16051201	1,0032	7,749	7,697	1539,308	194,805	7,902				
15 g corcho en 76.5 mL	16051202	0,9895	7,644	7,043	1408,538	196,078	7,184	Media	7,739		
15 g corcho en 119.5 mL	16051205	0,66097	5,117	5,103	1020,562	125,523	8,130				
	16051206	0,65736	5,089								

Gentileza de IPROCOR (Fecha de realización del ensayo 16/05/2012)

### Fibras

En este estudio se han empleado diferentes tipos de fibra, que se describen brevemente a continuación.

#### Fibras de vidrio:

La utilización de refuerzos, como fibras de vidrio, es una opción para aumentar la resistencia a flexión del hormigón y cambiar su comportamiento a rotura. De esta forma se consigue que la rotura de la pieza de hormigón no sea tan frágil, la posibilidad de una deformación mayor antes de rotura y que, cuando rompa, la fractura no sea catastrófica.

El problema de las fibras de vidrio es que se ven atacadas por los álcalis de los cementos y se degradan. Por eso es fundamental cuando se introducen en el hormigón que sean de un tipo resistente a los álcalis.

Todo lo expuesto llevó a ensayar la fibra denominada ANTI-CRAK® HP, que son hilos cortados de fibra de vidrio AR para el refuerzo de hormigones y morteros.

Gracias a su tamaño, este tipo de fibras no entraña peligro para el sistema respiratorio.

Fibras de polipropileno:

MASTERFIBER 21 es una fibra 100% de polipropileno, especialmente diseñada para su empleo en hormigón. Gracias a la red tridimensional que forma, evita la aparición de fisuras motivadas por retracción, mejorando de forma sustancial la calidad de la estructura de hormigón ejecutada. A continuación se resumen algunas de las propiedades más importantes de este tipo de fibra.

Propiedades

Material:	Polipropileno 100% (color blanco).
Longitud de fibra:	6 mm
Diámetro de fibra:	31 – 35 $\mu\text{m}$
Densidad:	0,91 $\text{g}/\text{cm}^3$
Elongación a rotura:	80 - 140%.
Punto de fusión:	163 – 170° C.
Contenido álcalis:	Ninguno.
Contenido sulfatos:	Ninguno.
Contenido cloruros:	Ninguno.
Absorción:	Ninguna.
Resistencia a ácidos/álcalis	Excelente.

La siguiente figura muestra la morfología de este tipo de fibras.

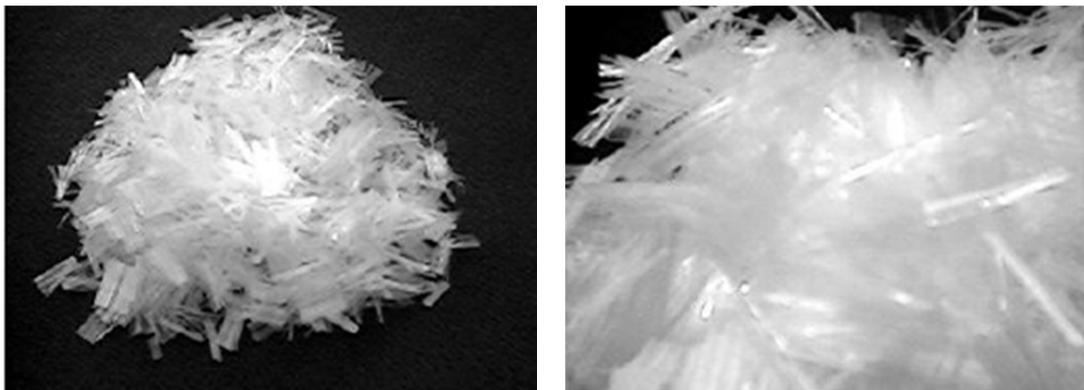


Figura 3.19.- Fibra MASTERFIBER 21.

#### 3.2.4.- Diseño de experimentos

Con el propósito de establecer la influencia de las variables de operación sobre el proceso de preparación de las probetas objeto de estudio, así como las posibles interacciones existentes entre ellas y –si es posible- determinar un óptimo dentro de los límites de estudio, se llevó a cabo un diseño estadístico de experimentos. Como variables objetivo se eligieron la resistencia a flexión, la resistencia a compresión, la densidad, la capacidad de transmisión térmica y el coeficiente de extinción de ruido. Las variables de estudio seleccionadas, que se prevé tengan un efecto importante sobre la variable objetivo son tres: contenido de árido, contenido de corcho y contenido de carbonato de calcio en las probetas.

A continuación, en la tabla 3.6, se muestran las variables del diseño, la región de estudio entre los valores máximo y mínimo que toman dichas variables, el valor central y el paso. A partir de estos valores y de la ecuación que permite obtener los valores reales a partir de los codificados se obtienen los experimentos que conforman el diseño (ver tabla 3.7). Dichos experimentos deben realizarse en el orden indicado con el fin de tener en cuenta los errores ocultos en el procedimiento experimental.

**Tabla 3.6.-** Variables de estudio en la preparación de probetas de hormigón

Variable	Valor Central	Paso	Valor Máximo	Valor Mínimo
Contenido de árido	900	505	1405	395
Contenido de corcho	67	67	134	0
Contenido de carbonato de calcio	175	147	322	28

Tabla 3.7- Diseño de experimentos planificado. Valores de las variables descodificadas para cada experimento.

Experimento	Contenido de árido	Contenido de corcho	Contenido de CaCO <sub>3</sub>
1	900	67	28
2	1405	67	175
3	900	67	175
4	900	134	175
5	600	107	88
6	900	67	322
7	1200	107	88
8	900	67	175
9	900	67	175
10	1200	27	88
11	600	27	88
12	600	27	263
13	395	67	175
14	900	0	175
15	1200	107	263
16	900	67	175
17	900	67	175
18	1200	27	263
19	900	67	175
20	600	107	263
21	900	67	175

Experimento	Contenido de árido	Contenido de corcho	Contenido de CaCO <sub>3</sub>
22	900	67	175
23	900	67	175

### 3.2.5.- Procedimiento de preparación de las muestras.

Tal y como se ha comentado en los apartados anteriores, se procedió a emplear moldes de probetas cúbicas homologadas para ensayos de rotura a compresión según norma UNE 83-300 a 304-84, es decir, de 15x15x15 cm.

Cabe señalar que, en los ensayos previos, se ejecutaron aproximadamente 500 familias de probetas, por lo que se hizo necesario optimizar la utilización de los moldes

Dado el carácter no destructivo de los ensayos de conductividad térmica y acústica, fueron éstos los primeros que se realizaron. A continuación se procedió a realizar los ensayos destructivos a compresión según las normas UNE anteriormente citadas.

Para los ensayos a flexión se optó por desarrollar unos moldes no homologados por la norma UNE 83-306 que regula el ensayo de tracción indirecta o flexotracción, también conocido como ensayo brasileño. Ello es así porque, de esa forma, se pueden obtener resultados de estética y emplearlos en ensayos destructivos de impacto. Incluso es posible emplear a tales fines los fragmentos resultantes de los ensayos. Por ello se procedió a emplear moldes de muestrario de baldosa de 30x30x5 cm. Estas piezas o baldosas también se emplearon en algunos ensayos no destructivos de conductividad térmica.

Finalmente, se emplearon moldes cilíndricos de dos diámetros para llevar a cabo los ensayos acústicos no destructivos.



Figura 3.20.- Molde para probeta de 99 mm diámetro (izquierda) y de 29 mm diámetro (derecha).

La siguiente figura muestra dos probetas preparadas empleando ambos tipos de molde.



Figura 3.21.-Probetas preparadas empleando los moldes de 29 mm diámetro (izquierda) y de 99 mm diámetro (derecha).

El procedimiento experimental se describe a continuación.

Se procede al pesaje y cubicación de las muestras a llenar y se prepara el material, para que la ejecución sea en una misma masa para cada familia, evitando dispersiones por ser de dos amasadas diferentes, situación que no se dio en las fases previas.

Una vez confeccionadas las familias de probetas, se les aplica el proceso de curado que dicta la norma UNE 301 en cámara húmeda para curado de hormigones hasta rotura a 28 días.

Con el objeto de valorar la evolución en el tiempo de los hormigones así preparados, se ejecutaron algunas probetas que permanecerán de los 28 a los 120 días al exterior, pero en local cerrado para su posterior rotura.

El orden de preparación seguido ha sido explicado anteriormente.

### **3.2.6.-Compuestos obtenidos y características**

Como ya se ha comentado, el objetivo no es único. Se busca un hormigón aligerado, trabajable, sin fisuras, con una resistencia de 20 MP, con capacidad aislante, impermeable y además resistente al fuego, ya que su uso ha de ser orientado al uso en viviendas. Es fácil suponer que la consecución de todas estas propiedades al mismo tiempo no es tarea fácil.

Por ello, y dada la coincidencia de resultados previos, se buscará un H2O lo más ligero y aislante posible por un lado, y un hormigón lo más ligero y aislante posible y que tenga una resistencia próxima a la de un ladrillo por otro.

El valor adoptado como media en los estudios estadísticos, es el que arrojó los mejores valores en los análisis previos a la ejecución de muestras estadísticas.

Es evidente que el conjunto se aligera, en tanto en cuanto sustituimos un árido denso por un corcho, lógicamente menos denso, en proporciones volumétricas idénticas. En estas condiciones siempre se estará por debajo de  $2\text{Tm/m}^3$ , y en muchos casos, próximos a  $1,1\text{Tm/m}^3$ .

Si bien la normativa que entrará en vigor antes de la lectura de esta tesis ya habrá limitado aun más la presencia de partículas blandas en hormigones, así como la reutilización de desechos en los mismos, no deja de ser simplemente de recomendado cumplimiento. En cualquier caso, se considerarán estas dosificaciones medias como un ejercicio de diseño.

Es obvio que partimos de un material ligero, pero hay que reseñar una característica no poco importante, y es que estos morteros así preparados, no presentan fisuración por retracción. La explicación a este comportamiento está, por una parte, en el trabajo silencioso del  $\text{Ca CO}_3$  que permite mantener relaciones de agua/cemento moderadas y constantes en todas las muestras

y, , por otra, en la elasticidad del corcho, que es capaz de absorber estos reajustes dimensionales con una tremenda facilidad.

Hay que destacar que no se ha conseguido un elemento aislante como tal, pero sí es valorable, la ejecución de morteros con la conductividad térmica de la madera, 0,31 y 0,39, y que en su inmensa mayoría, serán utilizados en espesores mayores que la citada madera, con lo que la condición térmica en el interior será muy similar a la de una vivienda de madera, sólo que más consistente.

Acústicamente, su comportamiento no deja de ser discreto, como es de esperar de un compuesto rígido como es el mortero, pero aún así, mejora entre un 10% y un 20% a un producto tan convencional, como el que es el objeto de nuestro estudio.

Se queda fuera de nuestro alcance en este momento la ejecución de una prueba de resistencia al fuego y un estudio de permeabilidad.

Finalmente, cabe reseñar que estéticamente se han obtenido resultados interesantes para cualquier prefabricador, pero de difícil valoración matemática

### **3.3.- Caracterización de las muestras**

Las probetas preparadas tal como se acaba de describir fueron caracterizadas mediante las técnicas analíticas que se relacionan a continuación.

#### **3.3.1.-Microscopía óptica.**

Para obtener las imágenes de microscopía óptica se empleó un equipo Nikon Epithot 300. El modo de trabajo incluyó el uso de luz policromática, polarizada. Para la toma de las imágenes no se insertó ningún filtro. Las fotografías se realizaron empleando lentes de 10 y 20 aumentos.

Las imágenes obtenidas como se acaba de describir se almacenaron y procesaron con la ayuda de un ordenador de sobremesa equipado con el software Qcapture desarrollado por QImaging Corporation (Surrey, BC, Canadá).

### **3.3.2.- Microscopía electrónica de barrido - Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDX).**

La adquisición de las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM, de acuerdo con sus siglas en inglés) y de los diagramas de espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDX) se llevó a cabo empleando un equipo Quanta 3D FEG (FEI Company, Hillsboro, EE.UU.). Las medidas se realizaron en el modo de trabajo de alto vacío, empleando un voltaje de aceleración igual a 15 kV. El detector utilizado fue el secundario (ETD) y la distancia de trabajo fue de 10 mm.

### **3.3.3.- Determinación de la resistencia a flexión**

Se procedió de acuerdo con la norma UNE-83-306-86, EN 196-1 = UNE 80-101-88 adaptada a las dimensiones de las baldosas empleadas; UNE 301 y 302, que indica el tipo de máquina a emplear; UNE 83-304, plato y barras de apoyo a emplear en función de las dimensiones de la probeta y con un ancho de 25 mm, según capítulo 2 de la norma UNE 304, y que define las distancias entre barras de apoyo (25 cm en nuestro caso) con la barra opuesta centrada,, ausencia de humedad en las muestras a ensayo ,prensa hidráulica con control de velocidad para incremento de carga constante  $0,03\text{Mpa/s}\pm 0,01$  , lector de carga de rotura .

Procedimiento:

Se aproximan los platos de la prensa hasta fijar el conjunto (aprisionando a la baldosa) sin carga. A continuación se aplica la carga de forma continua, de forma que ésta se incremente en  $0,3 \pm 0,1 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$

Se toma como valor de rotura el máximo alcanzado.

La tensión de rotura se calcula de acuerdo a la fórmula  $f_{ti}=2P/\pi*L+d$ , pero en este caso se trabajará con el valor P que es la carga de rotura en Kg fuerza (N) para los estudios estadísticos por ser valores mas fácilmente visibles

### **3.3.4.- Determinación de la resistencia a compresión**

Sera de aplicación la norma UNE 83-304-84 para ensayos de hormigón por rotura a compresión. Se utilizó una máquina provista de un sistema de regulación de cargas de forma que sea un proceso controlado y sin saltos. Dispone de platos de acero de dureza no inferior a 55HRC según UNE 7-053 y con una profundidad de tratamiento no inferior a 5 mm.

Su superficie es plana y rectificadas con un error inferior a 0,01mm cada 100mm. La dimensión menor de los platos supera en al menos un 3% al diámetro de la probeta a ensayar, teniendo acanaladuras de guía. Su espesor es suficiente como para que no se deformen. El plato superior está montado sobre una rótula esférica que permite giros de hasta 4º en el eje vertical. Están centrados eje de prensa, rótula y centro de plato, con un margen de 1/200 en la diagonal. La rótula posee un diámetro superior al 75% del diámetro de la probeta a ensayar. Los elementos de lectura de cargas se realizaron apreciando al menos un 1% del resultado de ensayo, siendo superior al 1,5% de la capacidad máxima de la escala empleada, indicando aparte siempre la carga máxima alcanzada en dispositivo. Fue verificada en periodos no superiores al año y cada 7000 ensayos, siguiendo la UNE 7281 al efecto.

Se clasifican como clase 1 y 2 en función de su precisión (mayor del 1% de precisión entre el 10% y el 90% de la escala empleada, o mayor del 2%). Las probetas deberán refrentarse según UNE 83-803 si sus irregularidades superan 0,1 mm o si su excentricidad es de más de 0,5º. Se ensayó con probetas exentas de humedad. La velocidad de carga fue de  $5 \pm 2$  Kg/cm<sup>2</sup> (0,5 $\pm$ 0,2 Mpa/s). La carga de rotura fue la máxima alcanzada por la prensa. Los resultados fueron modificados por las tablas de corrección fruto de los estudios estadísticos en base a sus dimensiones.

### **3.3.5.- Determinación de la densidad**

Según UNE 83 312-90 //317-91 //ISO 6275 el objeto es determinar un método de ensayo para obtener la densidad de hormigones frescos o compactados. Es aplicable a hormigones ligeros y pesados. El muestreo se hará según UNE 83-300 y el volumen no será inferior a 50 d3

La balanza empleada tendrá capacidad suficiente para la muestra a ensayar y una resolución del 0,1% del alcance máximo de la misma. El límite de error sería el 0,2%. Dispondremos de un recipiente estanco con un volumen y masa determinados con una incertidumbre del 0,1%. La

dimensión menor será al menos 4 veces el tamaño máximo nominal y nunca menor de 100 mm. El ensayo se llevará a cabo por diferencia de pesos tras relleno, se expresara en  $\text{kg/m}^3$  y se redondeara a  $10 \text{ kg/m}^3$ . Se corresponde con la norma ISO 6276

### **3.3.6.- Determinación de la capacidad de transmisión térmica**

Para determinar el coeficiente de conductividad térmica, emplearemos un equipo KEMTHERM QTM-D3, o método del hilo caliente transitorio. Utiliza una sonda especialmente diseñada por KEM, que se basa en la toma de datos en un entorno a  $25^\circ\text{C}$  y con una humedad relativa del 65%. Puede trabajar en líneas paralelas o trabajar en mallas perpendiculares. En nuestro caso, aprovechando que son muestras cúbicas, se tomaran medidas en caras adyacentes ya perpendiculares.

Se puede medir conductividad simple a 60sg, o hacer referencia a comparaciones con muestras patrón determinadas. Para poder referenciarlos a alguna norma UNE buscaremos las 8894-1 y 8894-2, aunque son empleadas en cerámica principalmente. En este caso mediremos a una distancia específica del hilo cruzado el incremento de la temperatura.

Existe una variante del método del hilo caliente para el caso cerámico, que está basada en una medición en continuo en la retícula empleada a lo largo del propio hilo. Hemos hecho una somera referencia en el capítulo de resultados a los valores comparativos que hemos marcado como objetivo.

### **3.3.7.- Determinación del coeficiente de extinción de ruido.**

Para la realización de la caracterización acústica se ha empleado un Kit de tubos de impedancia y transmisión acústica de la casa Brüel & Kjær que ofrece un amplio intervalo de tubos para mediciones acústicas de materiales, tales como el coeficiente de absorción de sonido, coeficiente de reflexión, impedancia y admitancia acústica y coeficiente de transmisión. La figura 3.22 ilustra el tubo de impedancia acústica empleado en los ensayos.



Figura 3.22.- Tubo de impedancia acústica

El sistema “Pulse Material Testing” puede medir las propiedades acústicas de casi cualquier muestra, incluidas las de materiales compuestos o irregulares como techos alicatados o baldosas acústicas agrietadas.

El sistema está basado en el método de medida de función de transferencia para dos micrófonos, lo que significa que las medidas se realizan en un tiempo mucho menor que con el método tradicional de onda estacionaria. Usando dos micrófonos fijos, el sistema de testeo realiza medidas simultáneas de todas las frecuencias de interés.

El software Pulse Material Testing 7758 funciona conjuntamente con el sistema de análisis múltiple y el tubo de impedancia (50 Hz- 6.4 kHz) o el tubo de impedancia (100 Hz- 3.2 kHz) tipo 4206A. Como consecuencia, es posible utilizar características avanzadas para calibración, mediciones, muestra de datos y generación de informes, la interfaz de usuario orientada a tareas, y la extrema precisión.

El sistema acústico empleado permite hacer medidas en muestras pequeñas según estándares internacionales de las normas ISO 10534-2 y ASTM E1050. El cálculo de la pérdida de transmisión se basa, como se ha indicado anteriormente, en el método de la función de transferencia.

El método de ensayo está normalizado mediante la Norma UNE EN ISO 10534-2:2002 Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.

En INTROMAC lo realizaron mediante un tubo de impedancia modelo 4206 T de Brüel & Kjaer, para el rango de frecuencias de 50 a 6400 Hz; sistema multi-analizador PULSE de 4 canales de Brüel & Kjaer, modelo 3560; micrófonos 1/4 de pulgada de Brüel & Kjaer, modelo 4187 y software Material Testing para Pulse de Brüel & Kjaer, modelo 7758.



Figura 3.23.- Detalle del tubo de impedancia utilizados en la obtención del coeficiente de absorción, impedancia característica y pérdidas por transmisión.

La muestra de ensayo se monta en uno de los extremos de un tubo de impedancia recto, rígido, liso y estanco. Se generan ondas planas en el tubo mediante una fuente sonora), y se miden las presiones acústicas en dos posiciones cercanas a la muestra. Se determina la función de transferencia acústica compleja de las señales en los dos micrófonos, que se usa para calcular el coeficiente de absorción para incidencia normal, y la impedancia normalizada del material en ensayo. Para la obtención de las pérdidas por transmisión (TL), la muestra de ensayo se monta en el interior del tubo a igual distancia, entre 2 parejas de micrófonos.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los principales resultados obtenidos en la caracterización de las muestras así como al aplicar el tratamiento estadístico, expuesto en el capítulo anterior, a los datos experimentales de resistencia a flexión, resistencia a compresión, densidad, capacidad de transmisión térmica y coeficiente de extinción de ruido.

### 4.1.- Caracterización de las muestras

Los hormigones que se han preparado de acuerdo con el protocolo descrito en el apartado 2.3 se han caracterizado mediante la aplicación de diversas técnicas. En concreto se han empleado las técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido combinada con espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDX).

Debido a que se han llegado a preparar 23 muestras, no todas han sido caracterizadas mediante las técnicas anteriormente mencionadas. Ello se ha debido, fundamentalmente, a razones de tiempo y coste de las técnicas analíticas. De hecho, se han analizado un grupo más reducido de muestras, correspondientes a los puntos centrales y estrella (esto es, aquellos en los que alguno de los factores alcanzaba el valor de  $\pm 1,68179$ ) del diseño de experimentos descritos en el capítulo anterior.

#### 4.1.1. Microscopía óptica.

La técnica de microscopía óptica permite abordar de modo inicial el estudio de la morfología de las muestras. No obstante, y a diferencia de lo que ocurre con las imágenes de microscopía electrónica de barrido (véase el apartado 4.1.2) las muestras no presentan diferencias notables, al menos cuando se trabaja con aumentos de x10 ó x20. Por ello, en la figura 4.1 se incluyen dos imágenes de una muestra que se ha considerado representativa del resto (en concreto la muestra número 3, que corresponde a un experimento central) y que han sido obtenidas empleando 10 y 20 aumentos. Estas imágenes ponen de manifiesto que, en principio, se ha conseguido un buen grado de cohesión entre las partículas de cemento y corcho. Por ello, puede afirmarse que las muestras así preparadas han cumplido con el objetivo inicial de lograr una adecuada dispersión del residuo en el seno de la mezcla, lo que

favorecerá la homogeneidad y reproducibilidad de los resultados de los diferentes ensayos llevados a cabo sobre cada una de las muestras que constituyen las series de trabajo.

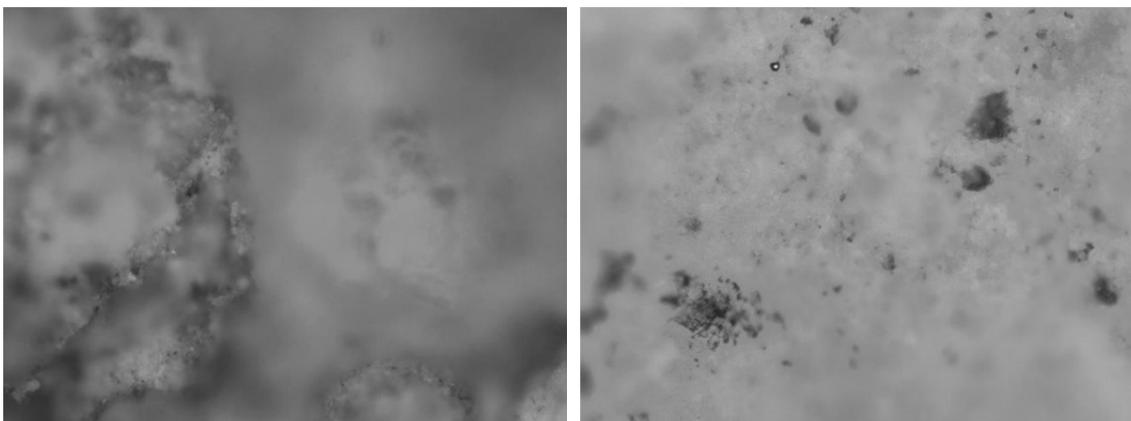


Figura 4.1.- Imágenes de microscopía óptica de la muestra número 3 empleando 10 aumentos (izquierda) y 20 aumentos (derecha).

#### **4.1.2. Microscopía electrónica de barrido - espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDX).**

La técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) permite la observación y caracterización superficial de diversos materiales, tanto inorgánicos como orgánicos.

La técnica presenta grandes ventajas como la alta resolución ( $\sim 100 \text{ \AA}$ ), la gran profundidad de campo que le da apariencia tridimensional a las imágenes y la sencilla preparación de las muestras.

El microscopio electrónico de barrido puede estar equipado con diversos detectores. En este caso, se empleó un detector de electrones secundarios para alto vacío que permitió obtener los correspondientes diagramas EDX.

En la figura 4.2 se presentan dos microfotografías correspondientes a la muestra número 5, que fue preparada empleando los valores codificados (árido, corcho,  $\text{CaCO}_3$ ) iguales a (-1, 1, -1) y bajo dos aumentos diferentes, concretamente 100x (izquierda) y 500x (derecha).

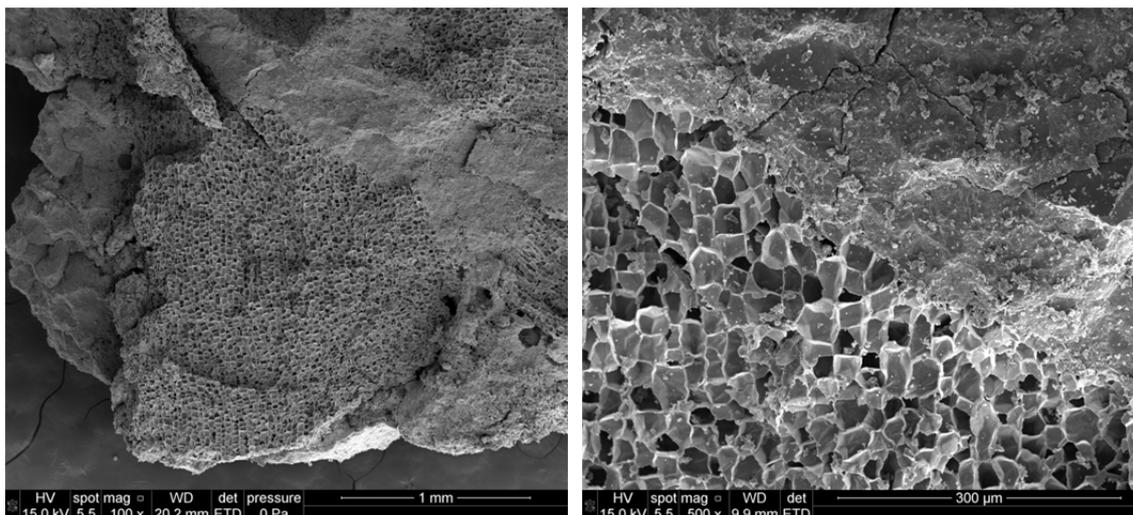


Figura 4.2.- Imágenes SEM de la muestra número 5.

A la vista de la figura puede concluirse que existe una evidente separación entre las partículas de corcho, estando el espacio entre ellas ocupado por la pasta de mortero y por el carbonato cálcico. Además, se aprecia una perfecta unión entre corcho y la pasta de mortero a través precisamente del carbonato. Por último, cabe destacar la ausencia de deformación que existe en las zonas sanas del corcho tras la rotura por compresión.

Por otra parte, la Figura 4.3 representa las imágenes SEM de la muestra designada con el número 13, preparada en ausencia de árido (valores codificados -1,68179, 0, 0). Los aumentos de ambas microfotografía son los mismos que en el caso de la muestra anterior.

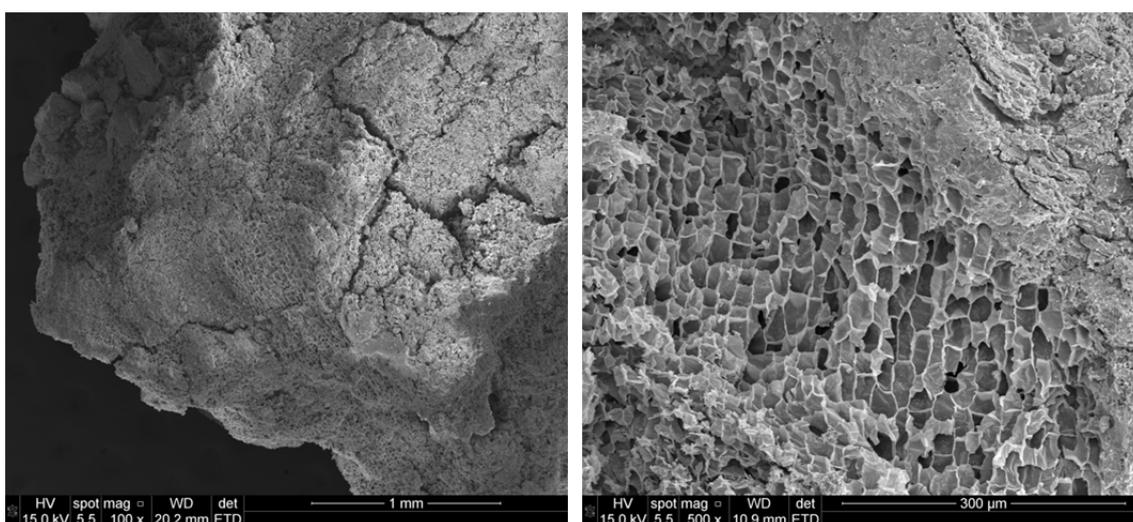


Figura 4.3.- Imágenes SEM de la muestra número 13.

Las imágenes de esta figura ponen claramente de manifiesto que, al no tener árido, el volumen de muestra ocupado por corcho es porcentualmente mayor y, además, la separación entre los granos de corcho es bastante menor que en el caso de la muestra 5 (y, como se verá posteriormente, de la 19). Una característica digna de destacar es la presencia de roturas en forma de “venas en escalera” (también conocidas por su denominación en frances, *feintes en échelon*) lo que revela la existencia de un esfuerzo en el mismo sentido en la pasta de mortero (esfuerzo que puede considerarse causado por la cizalla). Además, también en ese sentido se observa la presencia de una importante deformación de las células de corcho.

Por último, la figura 4.4 representa las imágenes SEM obtenidas para la muestra 19, que corresponde a uno de los experimentos centrales del diseño (es decir, con unos valores codificados de árido, corcho y carbonato 0, 0, 0). En esta figura se puede apreciar que, precisamente al tratarse de uno de los experimentos centrales, se ve ratificada la hipótesis inicial de que esta es la muestra ideal de partida para realizar el estudio estadístico. En la imagen se aprecia claramente un grano de árido reconocible fácilmente en la microfotografía realizada a 100x gracias a la presencia de la típica estructura en capas. Esta imagen revela, además, el alto grado de homogeneidad en la distribución de los agregados.

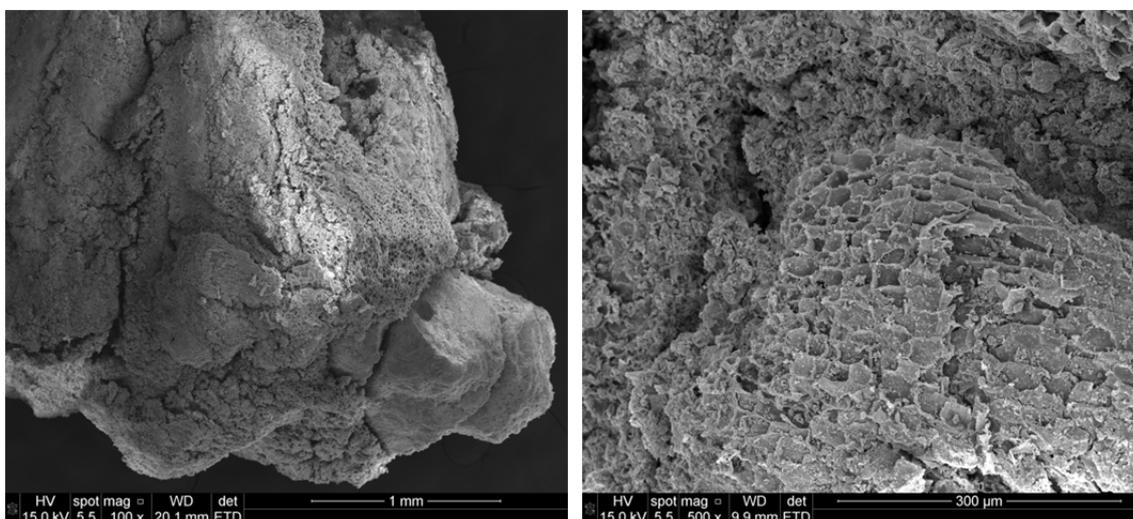


Figura 4.4.- Imágenes SEM de la muestra número 19.

Por otra parte, el equipo de microscopía electrónica de barrido permite también obtener los patrones de espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDX) que se muestran en la figura 4.5.

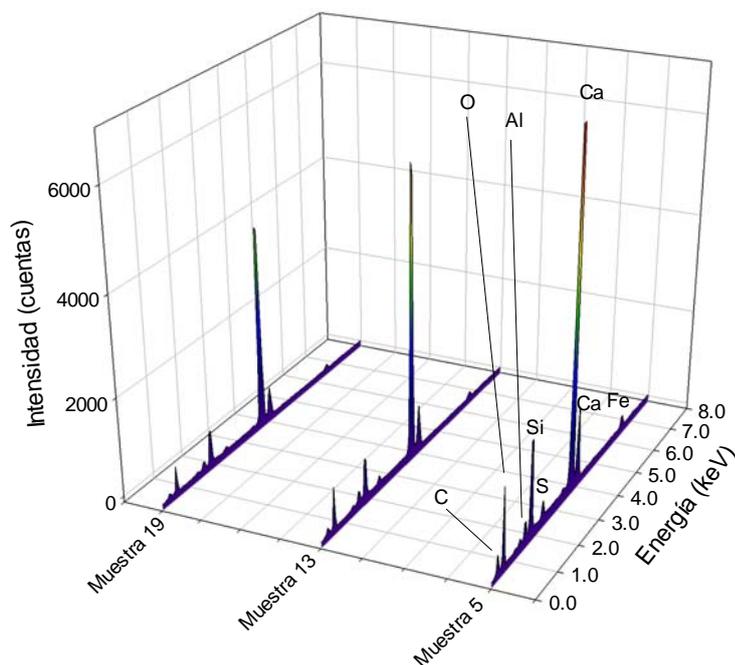


Figura 4.5.- Espectros EDX correspondientes a la interfase corcho-carbonato-mortero para las muestras 5, 13 y 19.

Los espectros de EDX de la figura 4.5 revelan la presencia de elementos como silicio, aluminio, oxígeno, hierro y calcio, todos ellos compatibles con la presencia de aluminosilicatos en las distintas muestras. Además, aparece también un pico correspondiente al carbono. Puesto que los microanálisis de EDX se realizaron en la interfase corcho-carbonato, ese carbono se puede atribuir al carbonato de calcio que se introdujo en la formulación.

Por otra parte, la espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDX) es también una técnica semicuantitativa, que permite estimar el porcentaje de átomos de determinado elemento que existe en la muestra que se ha analizado. Los valores correspondientes a las muestras 3, 5 y 23 se recogen en la tabla 4.1. Todos los análisis se realizaron por cuadruplicado.

**Tabla 4.1.** Resultados del análisis elemental por EDX

Muestra 5		
Elemento	% en peso	% atómico
Ca	45,8±2,4	27,0±2,2
O	44,8±3,6	65,9±3,4
Si	5,0±1,2	4,2±1,1
Fe	1,8±0,2	0,7±0,1
S	1,4±0,3	1,1±0,2
Al	1,1±0,1	0,9±0,1
C	0,1±0,0	0,2±0,0
TOTAL	100,0	100,0
Muestra 13		
Elemento	% en peso	% atómico
Ca	36,2±8,3	19,7±6,3
O	54,9±10,6	72,8±7,1
Si	4,3±1,6	4,1±1,5
Fe	2,0±0,2	1,5±1,0
S	1,4±0,5	1,0±0,6
Al	0,9±0,3	0,6±0,3
C	0,3±0,2	0,3±0,1
TOTAL	100,0	100,0
Muestra 19		
Elemento	% en peso	% atómico
Ca	44,3±15,3	27,2±12,4
O	44,8±18,5	62,8±14,4
Si	7,0±2,3	7,2±2,2
Fe	1,7±0,6	1,1±0,7
S	1,1±0,6	0,8±0,5
Al	0,9±0,5	0,7±0,5
C	0,2±0,2	0,2±0,2
TOTAL	100,0	100,0

A la vista de los valores de los microanálisis de EDX que se presentan en la tabla 4.1 se puede concluir que, en todos los casos, el elemento predominante en la muestra es el oxígeno, seguido por el calcio. Las muestras también presentan contenidos menores de Si, lo que sugiere la presencia de silicatos (o aluminosilicatos) en la mezcla.

## 4.2.- Análisis estadístico

### 4.2.1.- Resistencia a flexión

La tabla 4.2 muestra los resultados de los ensayos de resistencia a flexión de cada uno de las muestras preparadas, tanto aquellas que se han curado durante 28 días como las curadas durante 120.

Tabla 4.2.- Resultados de los ensayos de resistencia a flexión. Los tres factores de análisis en la dosificación para el estudio estadístico se muestran con sus valores codificados.

Muestra	% árido	% corcho	% CaCO <sub>3</sub>	Carga (N) de rotura a flexión de baldosas 30x30x5 cm (28 días)	Carga (N) de rotura a flexión de baldosas 30x30x5 cm (120 días)
1	0	0	-1.68179	3210	3590
2	1.68179	0	0	4320	4710
3	0	0	0	5080	6450
4	0	1.68179	0	4800	3930
5	-1	1	-1	3140	3340
6	0	0	1.68179	8430	8330
7	1	1	-1	5460	5260
8	0	0	0	6290	8080
9	0	0	0	6070	7460
10	1	-1	-1	6990	9300
11	-1	-1	-1	4230	4680
12	-1	-1	1	6380	6910
13	-1.68179	0	0	2290	3000
14	0	-1.68179	0	10130	11420
15	1	1	1	3760	3440

Muestra	% árido	% corcho	% CaCO <sub>3</sub>	Carga (N) de rotura a flexión de baldosas 30x30x5 cm (28 días)	Carga (N) de rotura a flexión de baldosas 30x30x5 cm (120 días)
16	0	0	0	5680	6060
17	0	0	0	7250	6810
18	1	-1	1	7790	6720
19	0	0	0	6900	7620
20	-1	1	1	3080	3130
21	0	0	0	4960	4460
22	0	0	0	4110	4510
23	0	0	0	3940	5030

En primer lugar, se estimó de interés el analizar si existían diferencias significativas entre los valores de resistencia a flexión obtenidos a ambos tiempos de curado. En primer lugar, la figura 4.6 representa un diagrama de caja y bigotes correspondiente a ambas series de experimentos.

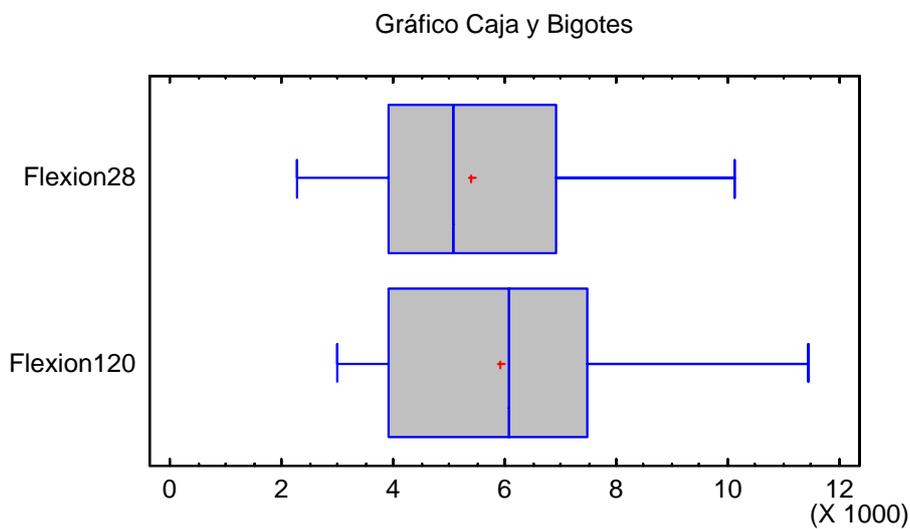


Figura 4.6.- Diagrama de caja y bigotes para las muestras curadas durante 28 y 120 días.

La caja (zona sombreada en gris) se extiende desde el cuartil inferior de la muestra hasta el cuartil superior. Por lo tanto, abarca la mitad de los valores de los datos cuando se ordenan de menor a mayor. La línea vertical que divide en dos partes la citada caja corresponde a la

mediana de cada una de las dos series de datos, mientras que el signo “+” en rojo marca la correspondiente media. Los bigotes (líneas horizontales) se dibujan partiendo de los puntos extremos de la caja hasta el valor más grande y más pequeño de cada una de las series de datos. La semejanza entre los diagramas de las muestras curadas durante 28 y 120 días apunta a que el tiempo de curado no afecta de forma importante a la resistencia a flexión. Lo mismo se puede afirmar a la vista del gráfico de densidades suavizadas que se representa en la figura 4.7. Dicho gráfico da una estimación no paramétrica de la función de densidad de probabilidad de las muestras. Para generarlo se calcula el número de observaciones que caen dentro de una ventana de amplitud establecida que se mueven a través del rango de los datos.

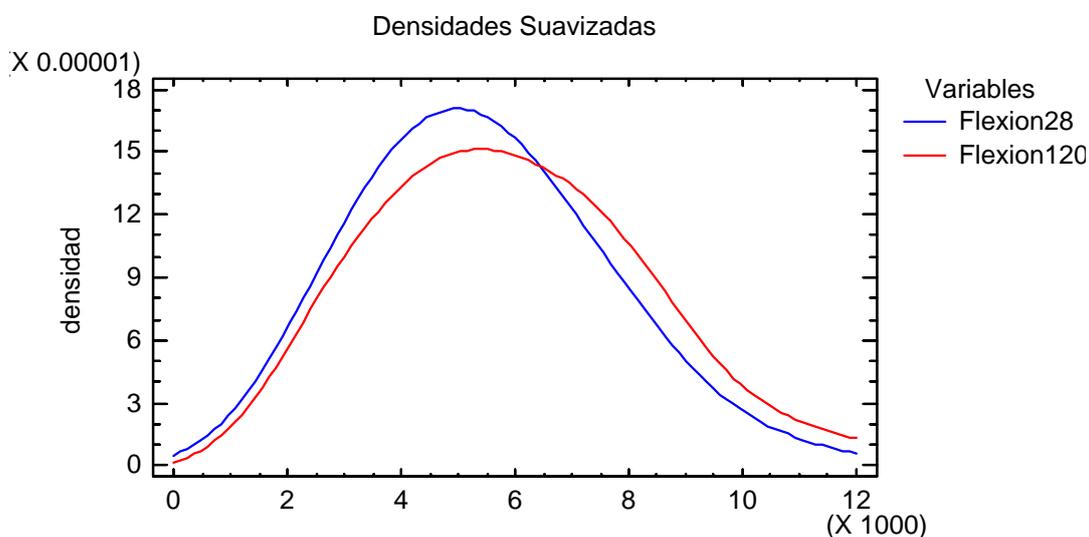


Figura 4.7.- Gráfico de densidades suavizadas para las muestras curadas durante 28 y 120 días.

Ahora bien, aunque las gráficas de las figuras 4.6 y 4.7 sugieren que no existen diferencias entre las dos muestras, para determinar si las posibles diferencias existentes son estadísticamente significativas se pueden realizar distintas pruebas de hipótesis. En este caso se ha procedido a realizar una comparación de las desviaciones estándar, de las medias y de las medianas.

La comparación de las desviaciones estándar se realiza mediante la aplicación del estadístico  $F$ , que permite determinar si las desviaciones estándar son significativamente diferentes al considerar el radio de varianza definido por:

$$\varpi = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \quad [4.1]$$

donde  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$  representan las desviaciones estándar de cada una de las dos series que aquí se comparan.

El resultado de este test de hipótesis se muestra a continuación:

Tabla 4.3.- Test de hipótesis para la comparación de desviaciones estándar

	<i>Flexion28</i>	<i>Flexion120</i>
Desviación Estándar	1935.13	2192.48
Varianza	3.74474E6	4.80696E6
Gl	22	22

Razón de Varianzas= 0.779025

Para realizar el mencionado test de hipótesis se plantea como hipótesis nula que  $\sigma_1 = \sigma_2$  y como hipótesis alternativa que  $\sigma_1 \neq \sigma_2$ . El estadístico  $F$  es igual a 0,779025, siendo el valor  $P = 0,563081$ . Por tanto, al ser este valor  $P$  superior a 0,05 no se puede rechazar la hipótesis nula para un intervalo de confianza del 95%.

De la misma forma se puede proceder para comparar las medias. Para ello se realiza una Prueba  $t$  para determinar si las medias de las dos muestras son significativamente diferentes o no al considerar la diferencia definida por:

$$\Delta = \mu_1 - \mu_2 \quad [4.2]$$

donde  $\mu_1$  y  $\mu_2$  representan las medias de cada una de las series a comparar. En este caso se considera como hipótesis nula el que ambas medias sean iguales (es decir, que  $\mu_1 = \mu_2$ ) mientras que la hipótesis alternativa sería  $\mu_1 \neq \mu_2$ . Suponiendo varianzas iguales, el valor del estadístico  $t$  es igual a -0.837814, siendo el valor  $P$  de 0.406663. Por lo tanto, al ser este valor superior a 0,05 no puede rechazarse la hipótesis nula para un intervalo de confianza del 95%.

Por último, para efectuar la comparación de medianas se puede recurrir al estadístico  $W$  de Mann-Whitney (o de Wilcoxon). Esta prueba es particularmente útil en casos donde el

supuesto de normalidad es cuestionable y no se encuentra una transformación adecuada y en casos donde una o más observaciones son sospechosas de ser valores atípicos. Para las dos series de muestras las medianas son, respectivamente, 5080 y 6060. Como hipótesis nula se plantea que ambas medianas son iguales y como hipótesis alternativa se considera que no lo son. El estadístico  $W$  toma un valor de 32,5, siendo el valor  $P = 0,482045$ . De nuevo, ello nos lleva a que no se pueda rechazar la hipótesis nula para un intervalo de confianza del 95%.

En conclusión, puesto que las dos muestras presentan valores de media, mediana y desviación estándar que no pueden considerarse como significativamente diferentes desde el punto de vista estadístico, puede afirmarse que no existen diferencias significativas entre los valores de resistencia a flexión determinados para las muestras que fueron curadas durante 28 y 120 días.

Esta afirmación es de particular interés puesto que pone de manifiesto dos fenómenos relevantes. En primer lugar, revela que el hormigón modificado tiene un comportamiento igual (o al menos muy semejante) al del hormigón convencional en lo referente al incremento de resistencia. En segundo lugar, pone de manifiesto que la inclusión de un elemento extraño al hormigón, como es el corcho, no está ejerciendo ningún tipo de efecto negativo en los valores de resistencia al prolongarse el tiempo de curado, es decir, no parece afectar a la durabilidad.

Volviendo a los datos de la tabla 4.1, se va ahora a proceder al análisis de la influencia de las variables estudiadas (a saber, porcentajes de árido, corcho y carbonato de calcio) sobre la resistencia a flexión (sea ésta calculada al cabo de 28 o de 120 días).

La figura 4.8 representa el diagrama de Pareto para el diseño estadístico que se está tratando. El gráfico de Pareto muestra la mayor o menor influencia de cada variable de estudio sobre la variable objetivo (resistencia a flexión), al mismo tiempo que nos muestra la significatividad estadística de cada variable. Las barras representan el efecto de cada variable, siendo éstas el porcentaje de árido, el de corcho y el de carbonato de calcio, así como sus posibles combinaciones. Además, se observa en el gráfico el tipo de influencia que ejerce cada variable considerada; es decir, si su efecto sobre la resistencia a flexión es positivo (barra gris) o negativo (barra azul). En este sentido cabe decir que un efecto se considera positivo cuando es directamente proporcional al valor de la variable objetivo y negativo cuando es inversamente proporcional al mismo.

En la Figura 4.8 se representa el gráfico de Pareto para la resistencia a flexión de muestras curadas durante 28 ó 120 días. La línea vertical corresponde a un valor P de 0,05. Aquellos efectos cuya barra supera dicha línea se consideran estadísticamente significativos con una probabilidad del 95%. A la vista de esta figura puede decirse que, tanto en el caso de muestras curadas durante 28 días como en el de las que se curaron durante 120, las variables de estudio ejercen el mismo tipo de efecto sobre la variable objetivo. Es decir, un aumento del porcentaje de árido y del de  $\text{CaCO}_3$  se traduce en un aumento de la resistencia a flexión, mientras que un aumento de la cantidad de corcho adicionada a la formulación conlleva un descenso en la resistencia. Respecto a la interacción entre variables, el efecto es parecido para los dos tiempos de curado.

Diagrama de Pareto Estandarizada para resistencia a flexión

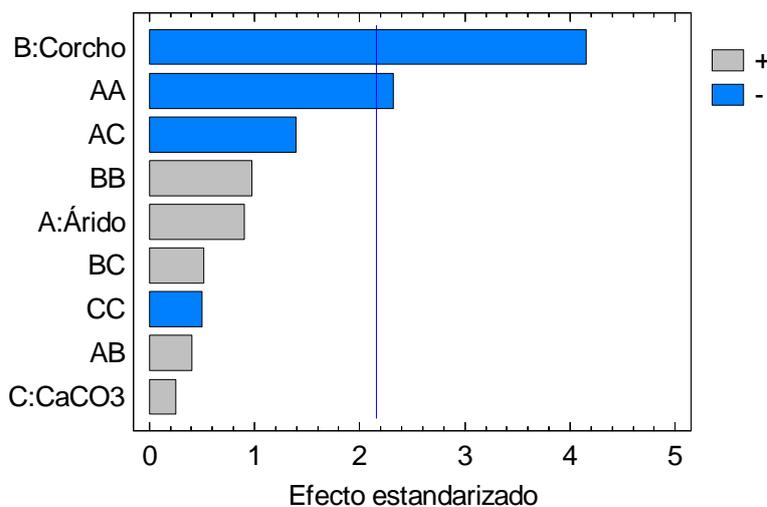
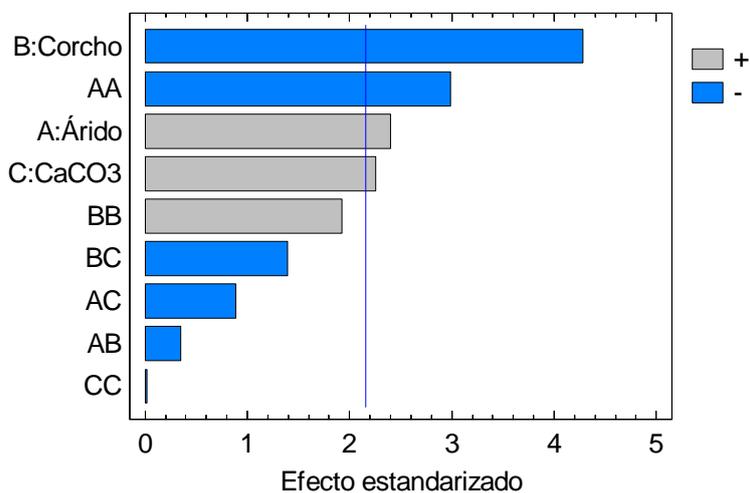


Figura 4.8.- Diagrama de Pareto para resistencia a flexión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

La mayor diferencia entre ambas series de muestras se encuentra en el número de variables que afectan de modo significativo a la resistencia a flexión. En el caso de las muestras curadas durante 28 días hay cuatro variables que presentan una influencia significativa (porcentaje de árido, porcentaje de corcho, porcentaje de carbonato de calcio y la interacción cuadrática del porcentaje de árido). Por el contrario, para las muestras curadas durante 120 días sólo el porcentaje de corcho y la interacción cuadrática del porcentaje de árido ejercen un efecto que puede considerarse como estadísticamente significativo.

La tabla 4.4 recoge los datos del análisis de varianza (ANOVA) para las muestras curadas durante 28 días.

Tabla 4.4.- Análisis de varianza para las muestras curadas durante 28 días.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor P
A:Árido	8,20262E6	1	8,20262E6	5,75	0,0322
B:Corcho	2,61947E7	1	2,61947E7	18,36	0,0009
C:CaCO <sub>3</sub>	7,27693E6	1	7,27693E6	5,10	0,0417
AA	1,27097E7	1	1,27097E7	8,91	0,0105
AB	171113,	1	171113,	0,12	0,7346
AC	1,11751E6	1	1,11751E6	0,78	0,3922
BB	5,27939E6	1	5,27939E6	3,70	0,0766
BC	2,77301E6	1	2,77301E6	1,94	0,1866
CC	425,73	1	425,73	0,00	0,9865
Error total	1,85451E7	13	1,42655E6		
Total (corr,)	8,23843E7	22			

R-cuadrada = 77,4896%; R-cuadrada (ajustada por g,l,) = 61,9054%; Error estándar del estimado = 1194,38; Error absoluto medio = 746,393; Estadístico Durbin-Watson = 1,45108 (P=0,1059),

Se aprecia que los cuatro efectos que superaban en el gráfico de Pareto la barra vertical (porcentaje de árido, porcentaje de corcho, porcentaje de carbonato de calcio y la interacción cuadrática del porcentaje de árido) presentan en la tabla un valor P inferior a 0,05, lo que

confirma de forma numérica que estos efectos ejercen una influencia estadísticamente significativa sobre la resistencia a flexión.

Además de esta información, el análisis de la varianza proporciona el valor de una serie de estadísticos que son interesantes. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica el 77,4896% de la variabilidad en la resistencia a flexión. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 61,9054%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 1194,38. El error medio absoluto (MAE) de 746.393 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si existe alguna correlación significativa basada en el orden en que se realizaron los experimentos. Puesto que el valor P es mayor que 0,05, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significatividad del 95%.

Por otra parte, la tabla 4.5 recoge los resultados del test de ANOVA para las muestras curadas durante 120 días.

Tabla 4.5.- Análisis de varianza para las muestras curadas durante 120 días.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor P
A:Árido	2,1796E6	1	2,1796E6	0,82	0,3822
B:Corcho	4,58988E7	1	4,58988E7	17,23	0,0011
C:CaCO <sub>3</sub>	167329	1	167329	0,06	0,8060
AA	1,43474E7	1	1,43474E7	5,39	0,0372
AB	441800	1	441800	0,17	0,6905
AC	5,15205E6	1	5,15205E6	1,93	0,1877
BB	2,54656E6	1	2,54656E6	0,96	0,3460
BC	720000	1	720000	0,27	0,6119
CC	674346	1	674346	0,25	0,6233
Error total	3,46297E7	13	2,66382E6		
Total (corr,)	1,06818E8	22			

R-cuadrada = 67,5805%; R-cuadrada (ajustada por g,l,) = 45,1362%; Error estándar del estimado = 1632,12; Error absoluto medio = 1027,22; Estadístico Durbin-Watson = 1,29291 (P=0,0950).

Los datos incluidos en esta tabla confirman lo apuntado por el gráfico de Pareto en el sentido de que, en este caso, dos efectos tienen un valor P por debajo de 0,05 (porcentaje de corcho e interacción cuadrática del porcentaje de árido), indicando que ejercen un efecto estadísticamente significativo sobre la resistencia a flexión con un nivel de confianza del 95%.

Otro instrumento de análisis gráfico de especial interés es el conocido como “gráfico de efectos principales” (figura 4.9).

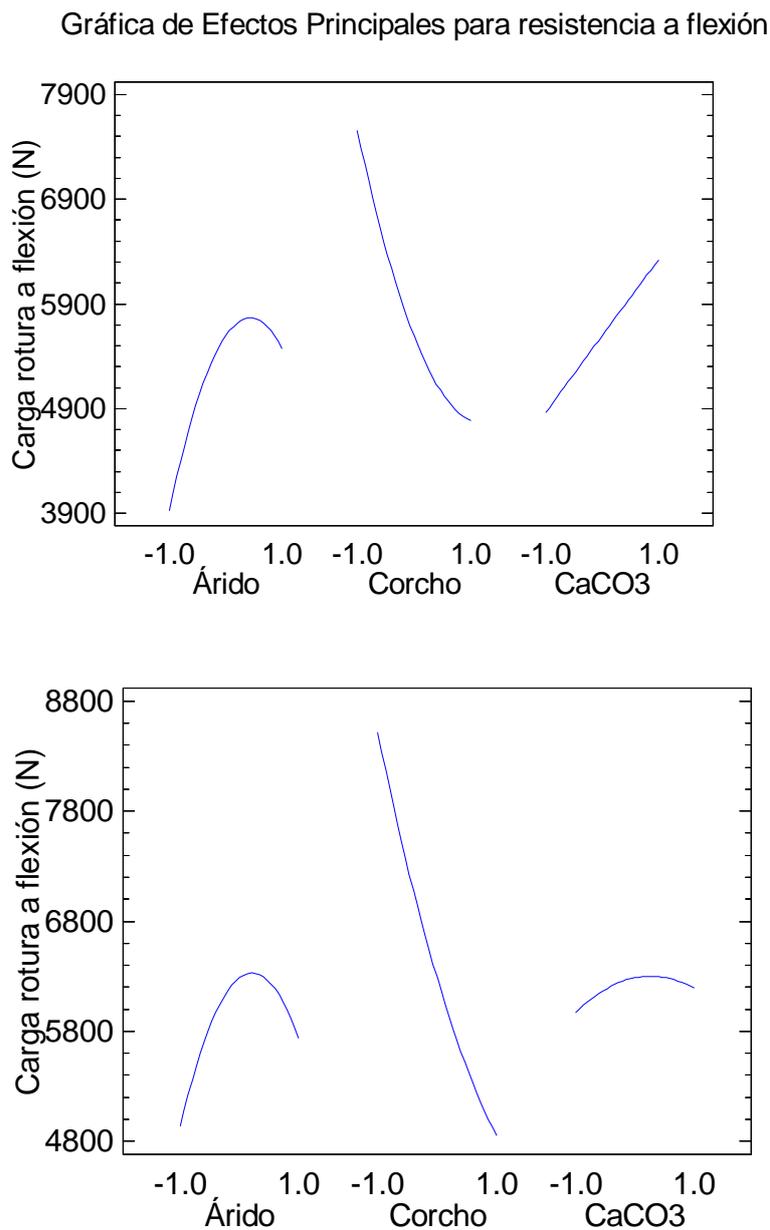
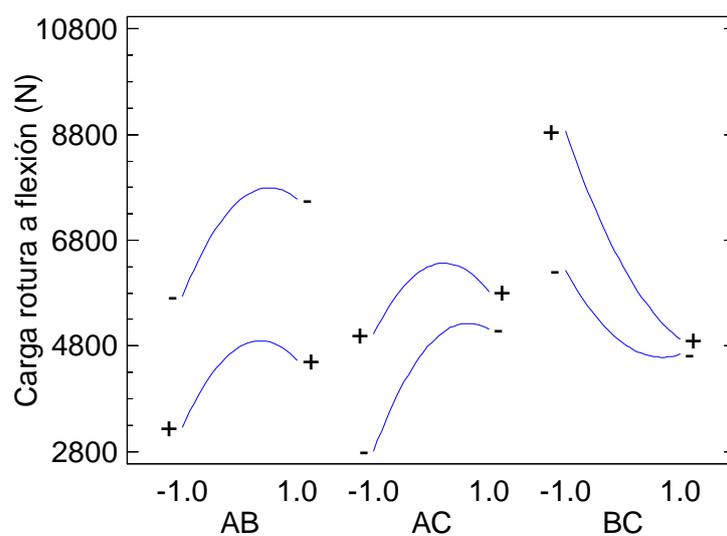


Figura 4.9.- Gráfico de efectos principales para resistencia a flexión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

En los gráficos de efectos principales de la figura 4.9 aparecen tres curvas que representan la variación de la resistencia a flexión con la modificación de una de las variables manteniendo las otras dos constantes. Como se puede observar en dicha figura, para el porcentaje de árido se aprecia claramente la existencia de un máximo en la región central de la curva. Para el porcentaje de corcho añadido a la formulación se observa un brusco descenso de la resistencia a flexión a medida que va aumentando esta variable. Por último, para el porcentaje de carbonato de calcio el efecto parece atenuarse al aumentar el tiempo de curado. Así, para las muestras curadas a 28 días se aprecia claramente un ascenso en la resistencia a flexión conforme se incrementa el porcentaje de caliza. Por el contrario, para las muestras curadas durante 120 días, se apunta un máximo en la resistencia a flexión en la zona central de la curva. En este sentido, conviene tener presente que la pendiente de la curva indica, a nivel cuantitativo, el peso de cada uno de los factores sobre la variable objetivo. Por ello, puede decirse que en este último caso el efecto del porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  es más suave.

Gráfica de Interacción para resistencia a flexión



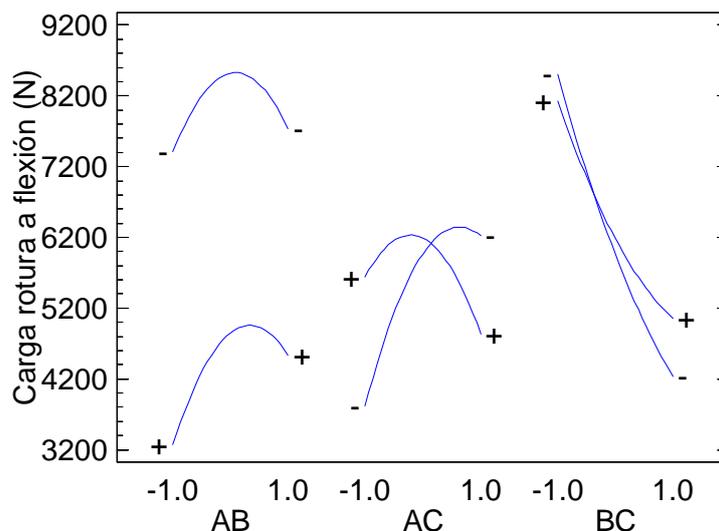


Figura 4.10.- Gráfico de interacción para resistencia a flexión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

Por otra parte, una de las principales aplicaciones del diseño estadístico de experimentos es analizar si existe o no interacción entre distintos pares de variables operativas. Para ello se recurre al “gráfico de interacción”.

Este tipo de gráficos representan la interacción entre cada dos de las  $n$  variables operativas estudiadas. En el caso del presente estudio, el gráfico de interacciones se muestra en la figura 4.10 y en él se incluye la interacción entre cada dos de las tres variables operativas objeto del estudio, y para los dos tiempos de curado.

Cada par de curvas representa la evolución de la resistencia a flexión mediante la variación de una variable en los extremos del diseño, es decir, con su valor igual a +1 y -1, mientras que la otra variable se mantiene constante. Si las líneas son paralelas ello es indicativo de que no hay interacción entre las variables; es decir, la modificación de una de las variables no afecta a la otra. Si las líneas se cruzan, ocurre lo contrario. Por otro lado, también se puede encontrar una situación intermedia, donde no se observa paralelismo pero las líneas tampoco se cruzan. En este caso, las dos líneas no tienen una tendencia similar; y se puede suponer que hay una interacción (la modificación de una de las variables afecta a la otra) ya que el cruce se produciría fuera de la región estudiada en el diseño.

A la vista de la forma de las gráficas de interacciones para las muestras curadas durante 28 días se aprecia claramente que, dentro del intervalo de trabajo, no existe interacción entre

ninguno de los tres pares de variables que se están analizando. En el caso del par porcentaje de árido-porcentaje de caliza (líneas AC) se intuye que las líneas pueden tender a cruzarse a valores altos pero fuera del intervalo (-1,+1). Esta tendencia se adivina mucho más claramente en el caso del par porcentaje de corcho-porcentaje de caliza (líneas BC).

El gráfico de interacciones para las muestras tratadas durante 120 días confirma las hipótesis que se acaban de plantear. En efecto, se puede apreciar que no existe interacción entre el par de variables porcentaje de árido-porcentaje de corcho (líneas AB), tal como ya ocurría en el caso de las muestras curadas durante 28 días. Sin embargo, para las líneas AC y BC existe un punto de corte claramente dentro del intervalo (-1,+1), lo que pone de manifiesto que la modificación del porcentaje de caliza (C) afecta de forma estadísticamente significativa los valores de resistencia a flexión que se obtienen al variar el porcentaje de árido (A) o de corcho (B).

Estos resultados son coherentes con los siguientes hechos:

- En primer lugar, con la relación de descenso de resistencia conforme se sustituye árido por corcho, por las propiedades mecánicas de ambos materiales.
- En segundo lugar, con la relación que existe entre la resistencia a flexión y la ocupación de los intersticios entre áridos por carbonato cálcico, si bien se aprecia que existe un límite que viene marcado por el punto a partir de que el carbonato cálcico empieza a ejercer un efecto disgregante.
- Y, en tercer lugar, con el efecto protector que ejerce el carbonato de calcio que envuelve las partículas de corcho evitando su excesiva hidratación.

Una de las mayores potencialidades del diseño estadístico de experimentos radica en el hecho de que es posible obtener los coeficientes del polinomio que ajusta los valores experimentales, según una regresión equivalente al estadístico R-cuadrada que proporciona el test de ANOVA cuyos resultados se han expuesto más arriba. En este caso, los datos experimentales de resistencia a flexión se han ajustado a una ecuación cuadrática del tipo:

$$y = \beta_o + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ji} \cdot X_j \cdot X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} \cdot X_i^2 \quad [4.3]$$

En el caso de las muestras curadas durante 28 días, esta ecuación general se particulariza en la siguiente:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{flexión}}(28 \text{ días}) = & 5595,77 + 774,999 \cdot \text{Árido} - 1384,94 \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 729,96 \cdot \text{CaCO}_3 - 894,366 \cdot \text{Árido}^2 - 146,25 \cdot \text{Árido} \cdot \text{Corcho} - \\
 & - 373,75 \cdot \text{Árido} \cdot \text{CaCO}_3 + 576,421 \cdot \text{Corcho}^2 - 588,75 \cdot \text{Corcho} \cdot \text{CaCO}_3 - \\
 & - 5,17625 \cdot (\text{CaCO}_3)^2
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

Por su parte, para los resultados obtenidos tras curar durante 120 días la ecuación de correlación es:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{flexión}}(120 \text{ días}) = & 6285,37 + 399,497 \cdot \text{Árido} - 1833,27 \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 110,691 \cdot \text{CaCO}_3 - 950,243 \cdot \text{Árido}^2 + 235,0 \cdot \text{Árido} \cdot \text{Corcho} - \\
 & - 802,5 \cdot \text{Árido} \cdot \text{CaCO}_3 + 400,336 \cdot \text{Corcho}^2 + 300,0 \cdot \text{Corcho} \cdot \text{CaCO}_3 - \\
 & - 206,01 \cdot (\text{CaCO}_3)^2
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

El signo positivo o negativo de cada uno de los coeficientes de las ecuaciones [4.4] y [4.5] indica si un determinado efecto o la interacción entre dos efectos influye favorable o desfavorable sobre la variable objetivo (resistencia a flexión). Además, cuanto mayor es el valor absoluto del coeficiente, mayor será la influencia del efecto o interacción sobre la variable de respuesta.

Se puede comprobar fácilmente cómo los efectos que se representaban en el diagrama de Pareto (figura 4.4) como positivos aparecen sumando en las ecuaciones anteriores, mientras que los que mostraban signo negativo se incluyen restando en esas ecuaciones.

En muchas ocasiones es conveniente eliminar del análisis los efectos no significativos. Ahora bien, para ello es necesario tener en cuenta que sólo pueden excluirse aquellas interacciones de dos factores que no sean significativas o bien efectos no significativos que no estén involucrados en interacciones significativas.

Por ello, a la vista de los resultados que se incluyen en las tablas 3.3 y 3.4, se ha optado por eliminar todas las interacciones salvo la cuadrática del porcentaje de árido en el caso de las muestras analizadas tras 28 días de curado. Para las muestras analizadas tras un periodo de curado de 120 días se ha procedido a eliminar esas mismas interacciones más el efecto del

porcentaje de caliza (que no ejerce por sí mismo ni en ninguna interacción una influencia significativa estadísticamente sobre la resistencia a flexión).

Las ecuaciones obtenidas tras proceder como se acaba de describir son las siguientes:

$$R_{\text{flexión}}(28 \text{ días}) = 5937,29 + 774,999 \cdot \text{Árido} - 1384,94 \cdot \text{Corcho} + 729,96 \cdot \text{CaCO}_3 - 898,288 \cdot \text{Árido}^2 \quad [4.6]$$

Por su parte, para los resultados obtenidos tras curar durante 120 días la ecuación de correlación es:

$$R_{\text{flexión}}(120 \text{ días}) = 6452,48 + 531,299 \cdot \text{Árido} - 1965,07 \cdot \text{Corcho} - 905,563 \cdot \text{Árido}^2 \quad [4.7]$$

En ambos casos, al disminuir el número de términos del ajuste se produce un ligero descenso del estadístico R-cuadrada.

En este sentido, la bondad del ajuste se puede comprobar representando gráficamente los valores observados para la resistencia a flexión frente a los valores predichos por las ecuaciones [4.4] y [4.5]. Así se ha hecho en la figura 4.11. En ella se observa que los puntos representados se acercan, en general, a la bisectriz del primer cuadrante. Por tanto se puede afirmar que existe una buena correlación entre los datos experimentales y calculados (sobre todo en el caso de las muestras curadas durante 28 días), lo cual verifica la bondad de las ecuaciones que proporcionan el método utilizado en el diseño estadístico y se puede afirmar que no ha habido errores experimentales significativos durante los ensayos.

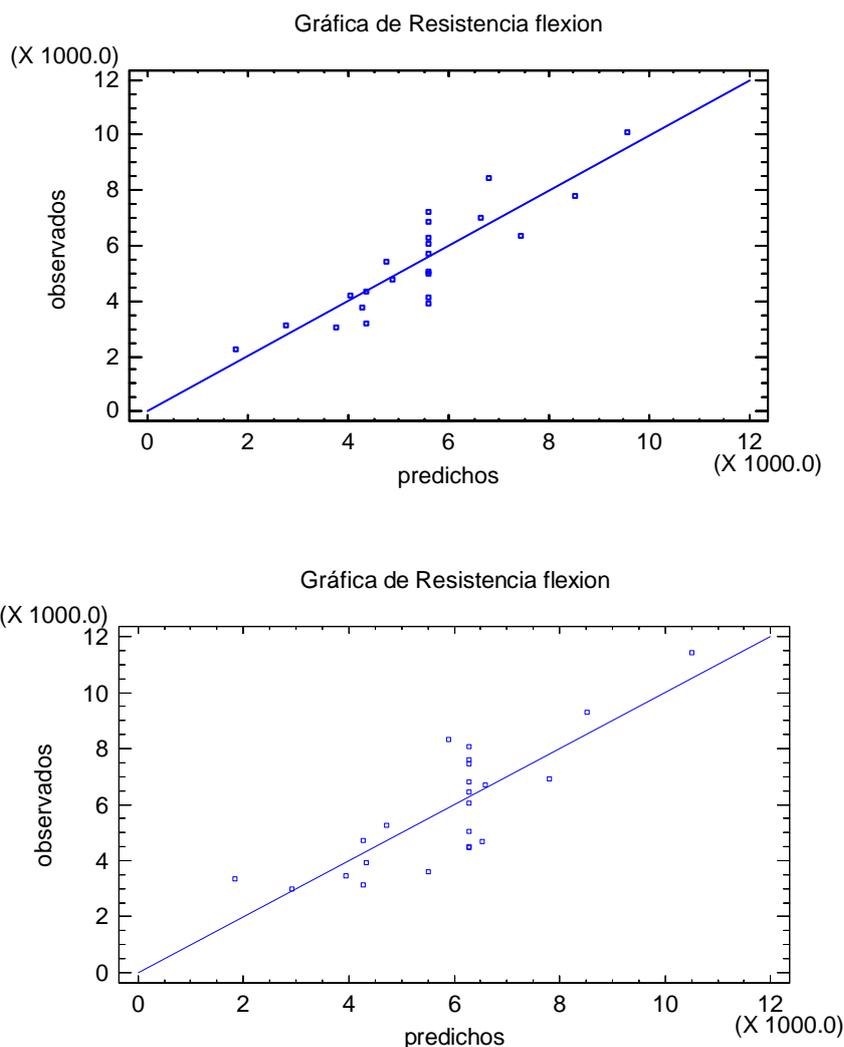


Figura 4.11.- Valores experimentales frente a los pronosticados para resistencia a flexión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

A partir del ajuste de regresión múltiple determinado por las ecuaciones [4.4] y [4.5] puede dibujarse el gráfico de superficie de respuesta, siendo éste el gráfico más importante de todos los estudiados. La superficie de respuesta, junto con las curvas de nivel que se representan en la parte inferior de la misma, aporta datos en dos sentidos diferentes: por una parte, la estimación concreta del óptimo y, por otra, la influencia diferencial de cada factor de estudio. Se puede apreciar desde la evaluación cualitativa cómo es el comportamiento de todo el sistema estudiado, la forma de la función, qué factores son más influyentes que otros y en qué regiones del espacio estudiado esta influencia se ve incrementada o disminuida.

Un modo alternativo de ver la forma de la función de respuesta es la representación de las curvas de nivel o de contorno. A partir de isolíneas o de áreas coloreadas con distinta

intensidad se puede apreciar tanto la aparición de un máximo como, sobre todo, las zonas en las que combinaciones adecuadas de los factores de estudio arrojan una respuesta idéntica del sistema.

La figura 4.12 muestra las superficies de respuesta y las curvas de nivel correspondientes a la resistencia a flexión en función de los porcentajes de árido y de corcho incluidos en la formulación, manteniendo el porcentaje de caliza constante y en su valor central.

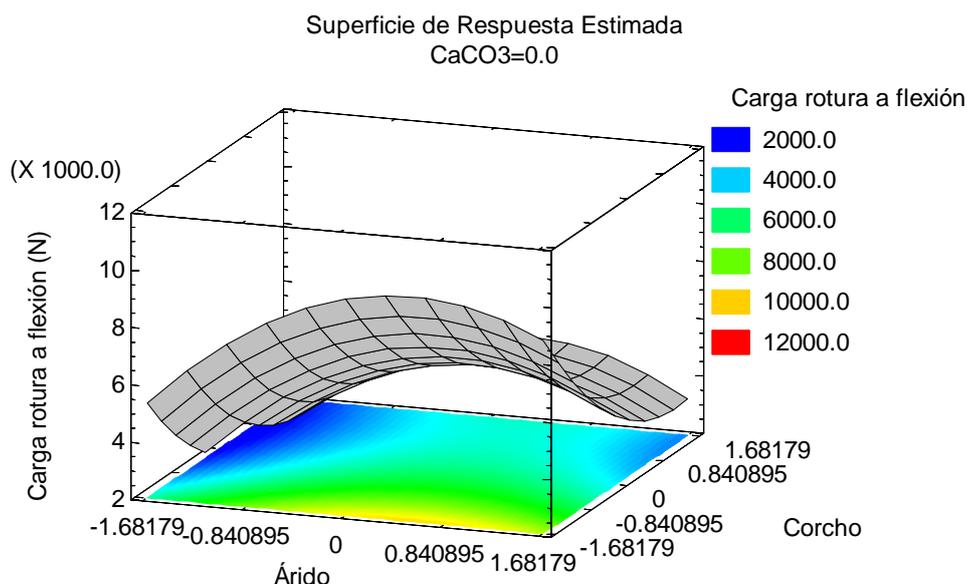


Figura 4.12.- Gráfico de superficie de respuesta y curvas de nivel para resistencia a flexión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo). El porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  se ha mantenido en su nivel central.

En la figura 3.7 se puede apreciar la tendencia hacia un máximo en la resistencia a flexión que se sitúa en el entorno de los 10000-11000 N y que se obtiene, en ambos casos para valores muy bajos de porcentaje de corcho (próximos a -1,68179 en valor codificado) y para valores del porcentaje de árido cercanos al central (para muestras curadas durante 120 días) o algo por encima de éste (en el caso de muestras curadas durante 28 días).

Por último, el diseño de experimentos permite predecir las condiciones en las que una determinada variable objetivo alcanzaría un valor óptimo. En el caso de la resistencia a flexión se ha considerado que la optimización de esta variable corresponde a su maximización. Las tablas 3.5 y 3.6 incluyen los valores codificados y reales que teóricamente permiten obtener un máximo para la resistencia a flexión medida a 28 y 120 días, respectivamente.

Tabla 4.6.- Valores codificados y reales para la obtención de un máximo en la resistencia a flexión. Muestras curadas durante 28 días.

Factor	Valores codificados			Valores reales		
	Bajo	Alto	Óptimo	Bajo	Alto	Óptimo
Árido	-1,68179	1,68179	0,214632	395	1405	964
Corcho	-1,68179	1,68179	-1,68179	0	134	0
CaCO <sub>3</sub>	-1,68179	1,68179	1,67914	28	322	322
Valor óptimo = 12472						

Tabla 4.7.- Valores codificados y reales para la obtención de un máximo en la resistencia a flexión. Muestras curadas durante 120 días.

Factor	Valores codificados			Valores reales		
	Bajo	Alto	Óptimo	Bajo	Alto	Óptimo
Árido	-1,68179	1,68179	0,695344	395	1405	1109
Corcho	-1,68179	1,68179	-1,6771	0	134	0
CaCO <sub>3</sub>	-1,68179	1,68179	-1,68179	28	322	28
Valor óptimo = 11046						

Si el valor óptimo se encuentra en uno de los vértices de la región de estudio (-1,68179 ó +1,68179) significa que no existe un valor óptimo local para esa variable en la región de estudio. Sólo podemos hablar de la tendencia o influencia de dicha variable de estudio sin hablar de un máximo. Tanto para las muestras curadas durante 28 días como durante 120, este es el caso del porcentaje de corcho y del porcentaje de caliza (a menor porcentaje de ambos, mayor eliminación). Sí que se obtiene claramente un óptimo para el caso del porcentaje de árido, lo que pone de manifiesto que la adición de grandes cantidades de este componente a la mezcla no se traduce en un posterior aumento en la resistencia a flexión.

**4.2.2.- Resistencia a compresión**

El tratamiento que se va a realizar a los datos de resistencia a compresión es, básicamente, el mismo que se ha llevado a cabo al analizar los de resistencia a flexión. Por tanto, los resultados de este análisis se expondrán de forma más sucinta que en el apartado anterior.

La tabla 4.8 muestra los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de cada uno de las muestras preparadas, tanto aquellas que se han curado durante 28 días como las curadas durante 120.

Tabla 4.8.- Resultados de los ensayos de resistencia a compresión. Los tres factores de análisis en la dosificación para el estudio estadístico se muestran con sus valores codificados.

Muestra	% árido	% corcho	% CaCO <sub>3</sub>	Resistencia a Compresión, MPa (28 días)	Resistencia a compresión, MPa (120 días)
1	0	0	-1,68179	11,4	10,9
2	1,68179	0	0	23,9	23,1
3	0	0	0	14,7	14,7
4	0	1,68179	0	8,1	8,6
5	-1	1	-1	4,9	4,4
6	0	0	1,68179	20,7	18,3
7	1	1	-1	11,3	11,8
8	0	0	0	14	11,9
9	0	0	0	17,2	16,1
10	1	-1	-1	25,1	26,3
11	-1	-1	-1	16,5	15
12	-1	-1	1	18,4	17,2
13	-1,68179	0	0	2,9	3,1
14	0	-1,68179	0	60,3	48,3
15	1	1	1	12,6	10,1
16	0	0	0	13,7	12,4
17	0	0	0	15,5	18,3
18	1	-1	1	33,3	29,5

Muestra	% árido	% corcho	% CaCO <sub>3</sub>	Resistencia a Compresión, MPa (28 días)	Resistencia a compresión, MPa (120 días)
19	0	0	0	18,9	16,9
20	-1	1	1	2,6	2,7
21	0	0	0	10,2	9,9
22	0	0	0	13,4	12,3
23	0	0	0	12,8	11,1

Al igual que en el caso anterior, se estimó de interés el analizar si existían diferencias significativas entre los valores de resistencia a compresión obtenidos a ambos tiempos de curado. El diagrama de caja y bigotes de la figura 4.13 representa un diagrama de caja y bigotes correspondiente a ambas series de experimentos.

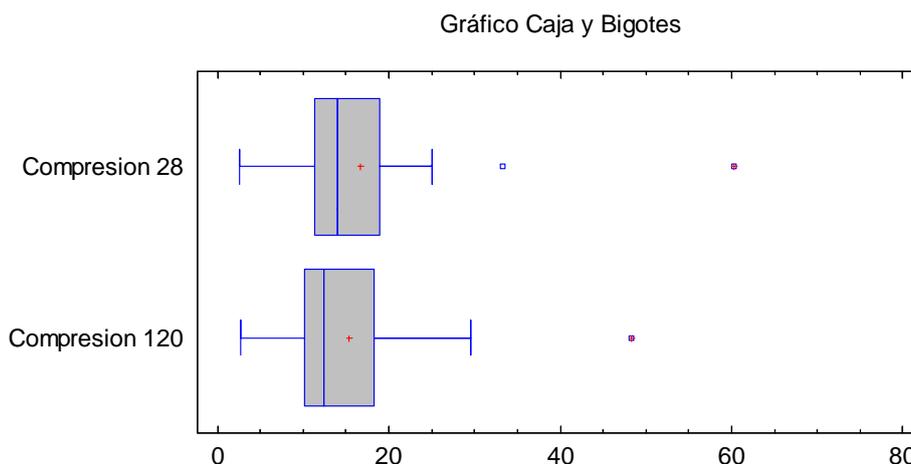


Figura 4.13.- Diagrama de caja y bigotes para las muestras curadas durante 28 y 120 días.

Los diagramas de las muestras curadas durante 28 y 120 días presentan una gran semejanza, lo que sugiere que el tiempo de curado no afecta de forma importante a la resistencia a compresión. Es de destacar que en ambos diagramas se aprecia la presencia de sendos puntos que se denominan “extremos”, y que son puntos localizados más de 1.5 veces el rango intercuartílico por encima o por debajo de la amplitud de la caja. Estos puntos se representan por un cuadrado azul. En el caso de que se sitúen más allá de 3 veces el rango intercuartílico por encima o por debajo de la caja el punto se denomina “extremo alejado” y se indica como símbolo de punto con un signo de suma encima. Cuando este tipo de puntos extremos o

extremos alejados están presentes, los bigotes se dibujan hasta los valores de los datos más grandes y más pequeños que no son puntos extremos.

En el caso de las muestras curadas a 28 días existe un punto extremo y otro extremo alejado. El primero corresponde a la muestra 18, cuyos valores codificados de porcentaje de árido, corcho y caliza son, respectivamente, 1, -1 y 1. El segundo corresponde a la muestra 14, que corresponde a un valor codificado del porcentaje de corcho igual a -1,68179 (es decir, a ausencia total de corcho en la formulación). Para las probetas curadas durante 120 días, el extremo alejado corresponde a esa misma muestra 18. Este hecho ya apunta a la importancia que tiene el contenido de corcho en la resistencia a compresión, y confirma lo ya visto en la resistencia a flexión en todos los sentidos, es decir, la relación directa que existe entre el incremento del porcentaje de corcho y la disminución de los valores de resistencia así como que el paso del tiempo no afecta negativamente a los valores de resistencia, de donde se puede deducir que no afecta a la durabilidad de los morteros así ejecutados.

El gráfico de densidades suavizadas se representa en la figura 4.14 y da idea de la similitud que existe entre las dos series de datos.

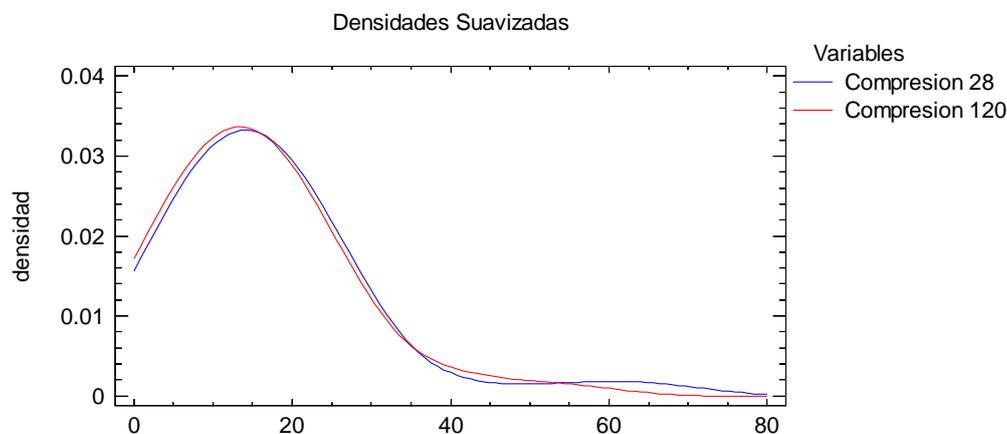


Figura 4.14.- Gráfico de densidades suavizadas para las muestras curadas durante 28 y 120 días.

No obstante, por coherencia con la metodología seguida al estudiar la resistencia a flexión, se han realizado las mismas pruebas de hipótesis, comparando las desviaciones estándar, las medias y las medianas de ambas series. Los resultados de esas pruebas se recogen en las tablas 3.8 y 3.9.

Tabla 4.9.- Test de hipótesis para la comparación de desviaciones estándar

	Compresión 28	Compresión 120
Desviación Estándar	11,8502	9,77803
Varianza	140,427	95,6098
Gl	22	22

Razón de Varianzas= 1,46876

La hipótesis nula es  $\sigma_1 = \sigma_2$  y la alternativa que  $\sigma_1 \neq \sigma_2$ . El estadístico  $F$  es igual a 1,46876 y el valor  $P = 0,374185$ . Por tanto no se puede rechazar la hipótesis nula para un intervalo de confianza del 95%.

La Prueba  $t$  para determinar si las medias de las dos muestras son significativamente diferentes o no, arroja un valor del estadístico  $t$  igual a 0,400376, siendo el valor  $P$  de 0,690817. Al ser este valor superior a 0,05 no puede rechazarse la hipótesis nula para un intervalo de confianza del 95%. Por lo tanto no puede rechazarse que las medias de ambas muestras sean iguales.

Por último, el estadístico  $W$  de Mann-Whitney (o de Wilcoxon) muestra un valor de -24.5, siendo el valor  $P = 0.597976$ , por lo que tampoco puede rechazarse la hipótesis nula (que postula que ambas medianas son iguales).

De nuevo, teniendo en cuenta que las dos muestras presentan valores de media, mediana y desviación estándar que no pueden considerarse como significativamente diferentes desde el punto de vista estadístico, puede afirmarse que no existen diferencias significativas entre los valores de resistencia a compresión determinados para las muestras que fueron curadas durante 28 y 120 días.

Los datos de la tabla 4.8 se han sometido a un análisis estadístico para determinar la influencia de los porcentajes de árido, corcho y carbonato de calcio sobre la resistencia a compresión. La figura 4.15 representa el diagrama de Pareto para tal diseño.

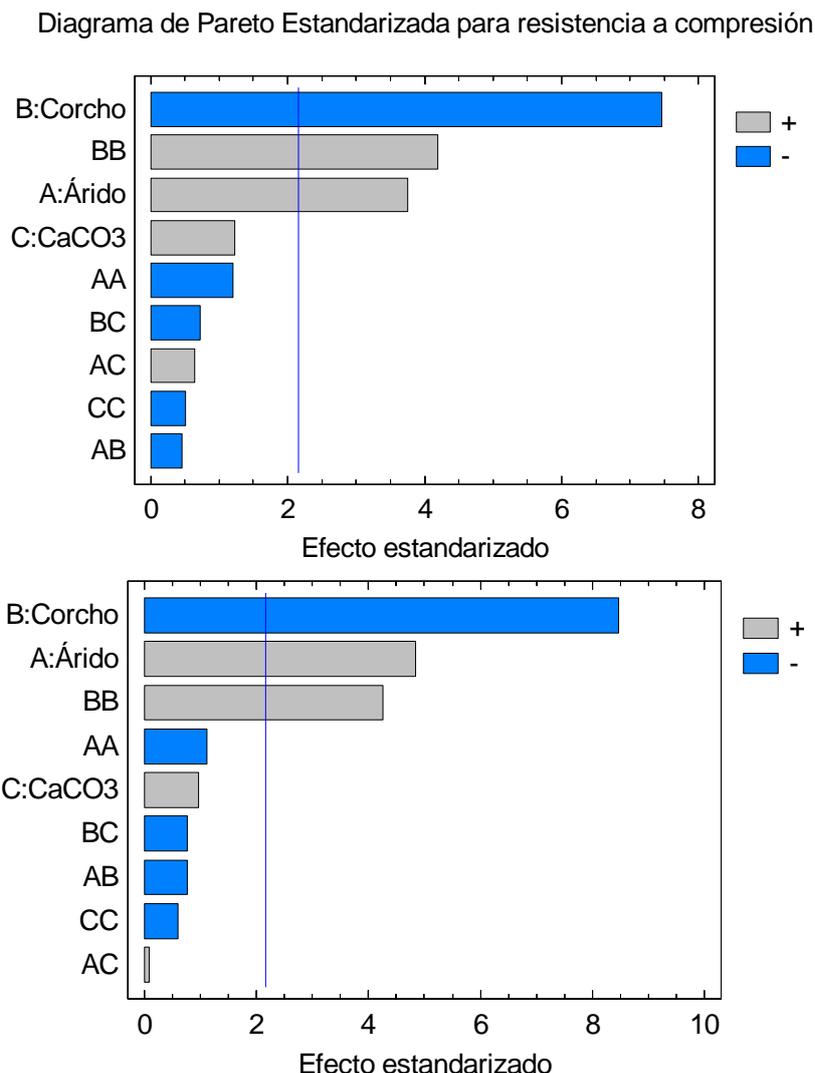


Figura 4.15.- Diagrama de Pareto para resistencia a compresión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

La Figura 4.15 pone de manifiesto que, con independencia del tiempo de curado, un aumento del porcentaje de árido y del de  $\text{CaCO}_3$  se traduce en un aumento de la resistencia a compresión (aunque en este segundo caso el efecto no es estadísticamente significativo). Por su parte, si la cantidad de corcho se incrementa se aprecia un importante descenso en la resistencia a compresión. Respecto a la interacción entre variables, únicamente el cuadrado de la cantidad de corcho presenta una influencia significativa sobre la variable objeto de estudio.

En el caso de la resistencia a compresión, el factor fundamental de su variación va a ser, casi exclusivamente, la presencia de corcho, cual si de partículas blandas se tratara, influyendo sólo levemente la presencia de  $\text{CaCO}_3$ .

La tabla 4.10 recoge los datos del análisis de varianza (ANOVA) para las muestras curadas durante 28 días.

Tabla 4.10.- Análisis de varianza para las muestras curadas durante 28 días.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor P
A:Árido	414.275	1	414.275	14.05	0.0024
B:Corcho	1640.71	1	1640.71	55.66	0.0000
C:CaCO3	44.82	1	44.82	1.52	0.2394
AA	42.5716	1	42.5716	1.44	0.2509
AB	6.30125	1	6.30125	0.21	0.6515
AC	12.2513	1	12.2513	0.42	0.5304
BB	519.343	1	519.343	17.62	0.0010
BC	15.4013	1	15.4013	0.52	0.4826
CC	7.78413	1	7.78413	0.26	0.6160
Error total	383.226	13	29.4789		
Total (corr.)	3089.4	22			

R-cuadrada = 87.5955%; R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 79.0077%; Error estándar del estimado = 5.42945; Error absoluto medio = 3.17483; Estadístico Durbin-Watson = 1.85544 (P=0.3870)

Como es de esperar, los mismos tres efectos que superaban en el gráfico de Pareto la barra vertical (porcentaje de árido, porcentaje de corcho, e interacción cuadrática del porcentaje de corcho) muestran un valor P inferior a 0,05, indicativo de una influencia estadísticamente significativa sobre la resistencia a compresión. Entre el resto de los estadísticos que se recogen en la tabla anterior cabe destacar el valor de R-cuadrada, que pone de manifiesto que el modelo propuesto ajusta de manera muy aceptable los datos experimentales, tal como se verá gráficamente más adelante. También interesante es el estadístico de Durbin-Watson (1.85544). Puesto que el valor P es mayor que 0,05, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significatividad del 95%.

Los resultados del test de ANOVA para las muestras curadas durante 120 días se resumen en la tabla 4.11.

Tabla 4.11.- Análisis de varianza para las muestras curadas durante 120 días.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor P
A:Árido	379.968	1	379.968	23.52	0.0003
B:Corcho	1158.2	1	1158.2	71.70	0.0000
C:CaCO <sub>3</sub>	15.2792	1	15.2792	0.95	0.3485
AA	20.4701	1	20.4701	1.27	0.2806
AB	9.68	1	9.68	0.60	0.4527
AC	0.125	1	0.125	0.01	0.9312
BB	292.705	1	292.705	18.12	0.0009
BC	9.68	1	9.68	0.60	0.4527
CC	5.81009	1	5.81009	0.36	0.5590
Error total	209.989	13	16.153		
Total (corr.)	2103.42	22			

R-cuadrada = 90.0168%; R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 83.1053%; Error estándar del estimado = 4.01908; Error absoluto medio = 2.54219; Estadístico Durbin-Watson = 2.18397 (P=0.6828)

Los datos incluidos en esta tabla coinciden en lo fundamental con lo que sugiere el test de ANOVA para un tiempo de curado de 28 días, con los mismos tres efectos que presentan una influencia estadísticamente significativa sobre la resistencia a compresión con un nivel de confianza del 95%.

Los gráficos de efectos principales de la figura 4.16 muestran que, a diferencia con lo que ocurría para la resistencia a flexión, en este caso no se aprecia el máximo para el porcentaje de árido en la región central de la curva. Por el contrario, un aumento en la proporción de árido se traduce en una mayor resistencia a lo largo de todo el intervalo de trabajo. Lo que sí es común con la resistencia a flexión es el marcado descenso de la resistencia a compresión a medida que va aumentando el porcentaje de corcho. Por último, el porcentaje de carbonato de calcio parece ejercer un efecto muy leve independientemente del tiempo de curado.

Esto es consecuencia de que las muestras ejecutadas no dejan de ser morteros que emplean una dosificación no ajustada exactamente a ninguna curva patrón de áridos, sino estandarizada para el estudio, con lo que las modificaciones en los áridos que favorezcan la mayor compacidad de la mezcla darán como resultado un incremento de la resistencia a compresión, con un valor máximo que con los áridos y áridos empleados la experiencia

personal señala que se halla próximo a los 90 MPa a 28 días. Este valor, evidentemente, queda fuera del objetivo de estos ensayos.

Gráfica de Efectos Principales para resistencia a compresión

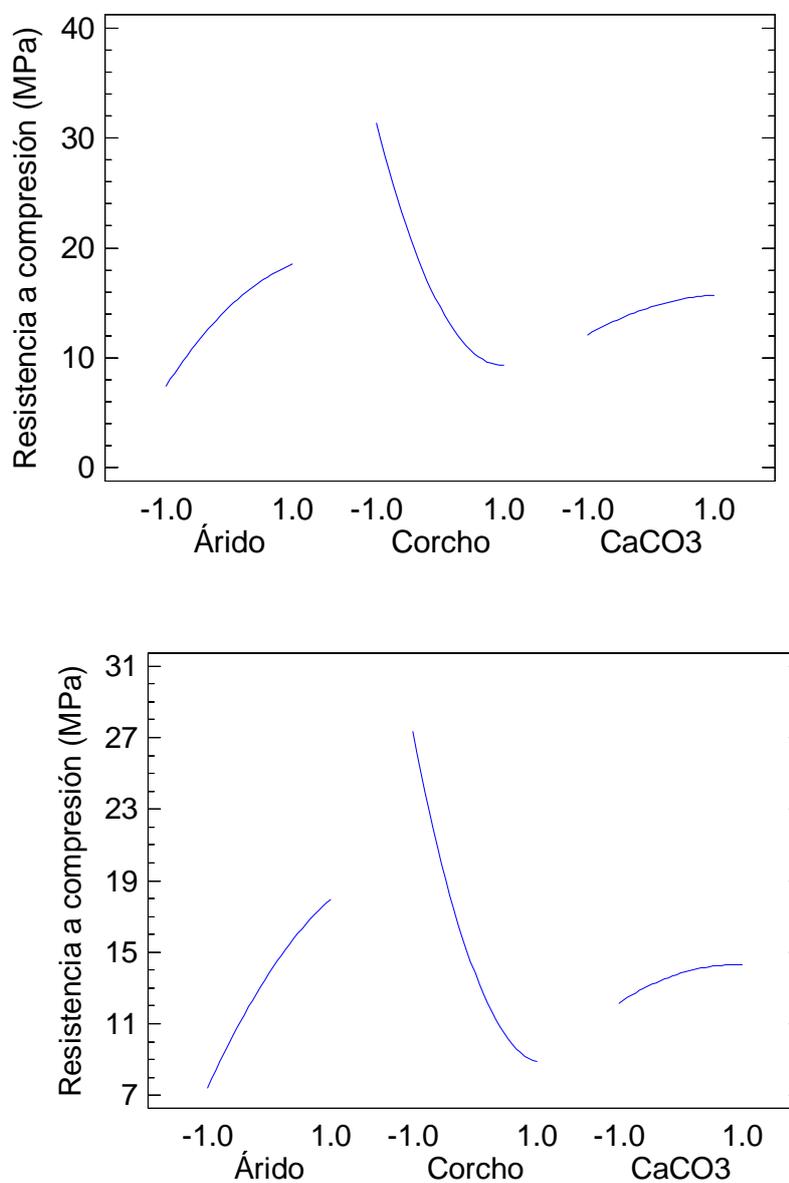


Figura 4.16.- Gráfico de efectos principales para resistencia a compresión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

El gráfico de interacciones pone de manifiesto que, cualquiera que sea el tiempo de curado, no existe interacción a lo largo del intervalo de trabajo entre los porcentajes de árido y corcho. La interacción entre el porcentaje de árido y el de caliza se apunta en la zona más baja de dicho intervalo de trabajo para las muestras curadas a 28 días, mientras que es prácticamente

inapreciable para las muestras curadas durante 120 días. Justamente lo contrario se observa para la interacción entre el porcentaje de corcho y el de caliza. Para muestras curadas durante 28 días esa interacción es inapreciable mientras que sí se observa claramente que las curvas se intersectan en el tramo más alto del intervalo de trabajo para las muestras cuyo tiempo de curado alcanza los 120 días. Este hecho podría estar relacionado con el efecto envolvente que ejerce el  $\text{CaCO}_3$  sobre el corcho, controlando así la hidratación y por tanto las relaciones agua/cemento.

Gráfica de Interacción para resistencia a compresión

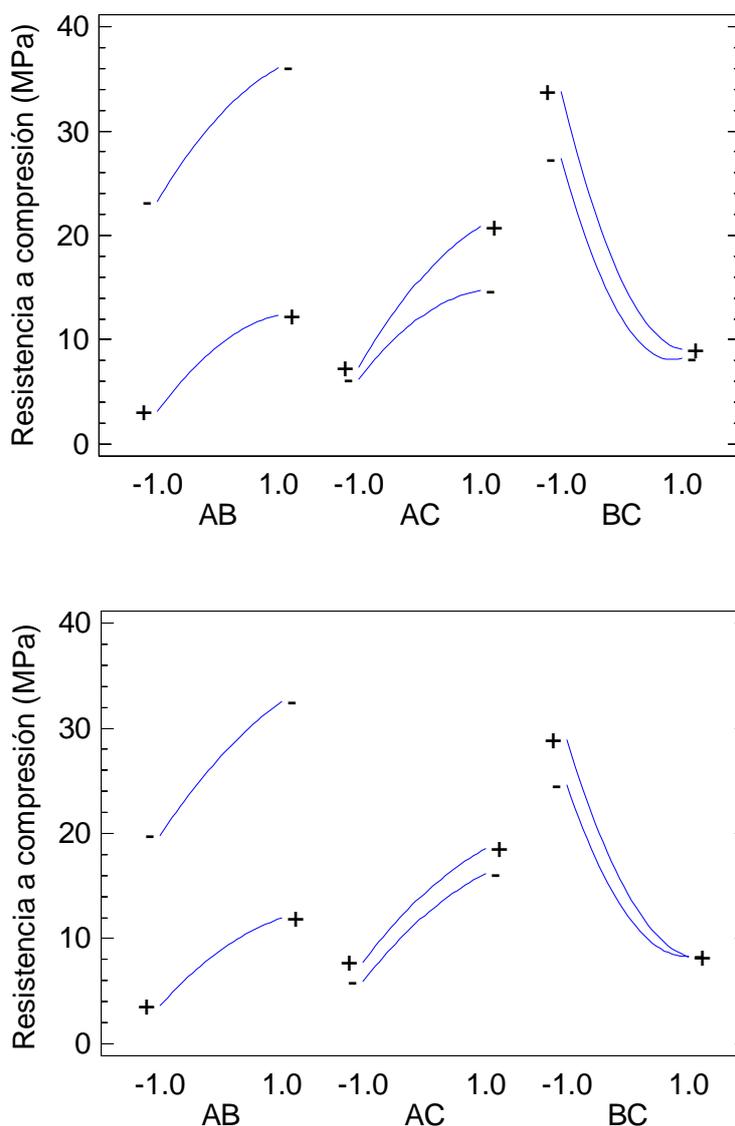


Figura 4.17.- Gráfico de interacción para resistencia a compresión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

Se ha procedido, como en el caso de la resistencia a flexión, a obtener los coeficientes del polinomio que ajusta los valores experimentales. Para las muestras curadas durante 28 días, la ecuación es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{compresión}}(28 \text{ días}) = & 14,6189 + 5,50769 \cdot \text{Árido} - 10,9608 \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 1,81159 \cdot \text{CaCO}_3 - 1,63685 \cdot \text{Árido}^2 - 0,8875 \cdot \text{Árido} \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 1,2375 \cdot \text{Árido} \cdot \text{CaCO}_3 + 5,71709 \cdot \text{Corcho}^2 - 1,3875 \cdot \text{Corcho} \cdot \text{CaCO}_3 - \\
 & - 0,699927 \cdot (\text{CaCO}_3)^2
 \end{aligned}
 \tag{4.8}$$

Por su parte, para los resultados obtenidos tras curar durante 120 días la ecuación de correlación es:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{compresión}}(120 \text{ días}) = & 13,828 + 5,27471 \cdot \text{Árido} - 9,20909 \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 1,05773 \cdot \text{CaCO}_3 - 1,13503 \cdot \text{Árido}^2 - 1,1 \cdot \text{Árido} \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 0,125 \cdot \text{Árido} \cdot \text{CaCO}_3 + 4,29203 \cdot \text{Corcho}^2 - 1,1 \cdot \text{Corcho} \cdot \text{CaCO}_3 - \\
 & - 0,604699 \cdot (\text{CaCO}_3)^2
 \end{aligned}
 \tag{4.9}$$

Conviene recordar que el signo positivo o negativo de cada uno de los coeficientes de las ecuaciones [4.8] y [4.9] indica el sentido y la influencia de un determinado efecto o la interacción entre dos efectos sobre la variable objetivo (resistencia a compresión). Como era de prever, los efectos que en el diagrama de Pareto (figura 4.15) aparecían como positivos vienen precedidos por un signo “+” en las ecuaciones anteriores, mientras que los que aparecían como negativos siguen a un signo “-” en esas mismas ecuaciones.

Como en el caso de la resistencia a flexión, se ha considerado conveniente eliminar del análisis los efectos no significativos. Procediendo de esa forma, las ecuaciones [4.8] y [4.9] se transforman en:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{compresión}}(28 \text{ días}) = & 13,2219 + 5,50769 \cdot \text{Árido} - 10,9608 \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 5,73313 \cdot \text{Corcho}^2
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

Y

$$\begin{aligned}
 R_{\text{compresión}}(120 \text{ días}) = & 12,7879 + 5,27471 \cdot \text{Árido} - 9,20909 \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 4,30398 \cdot \text{Corcho}^2
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

En la figura 4.18 se han representado gráficamente los valores observados para la resistencia a compresión frente a los valores predichos por las ecuaciones [4.8] y [4.9].

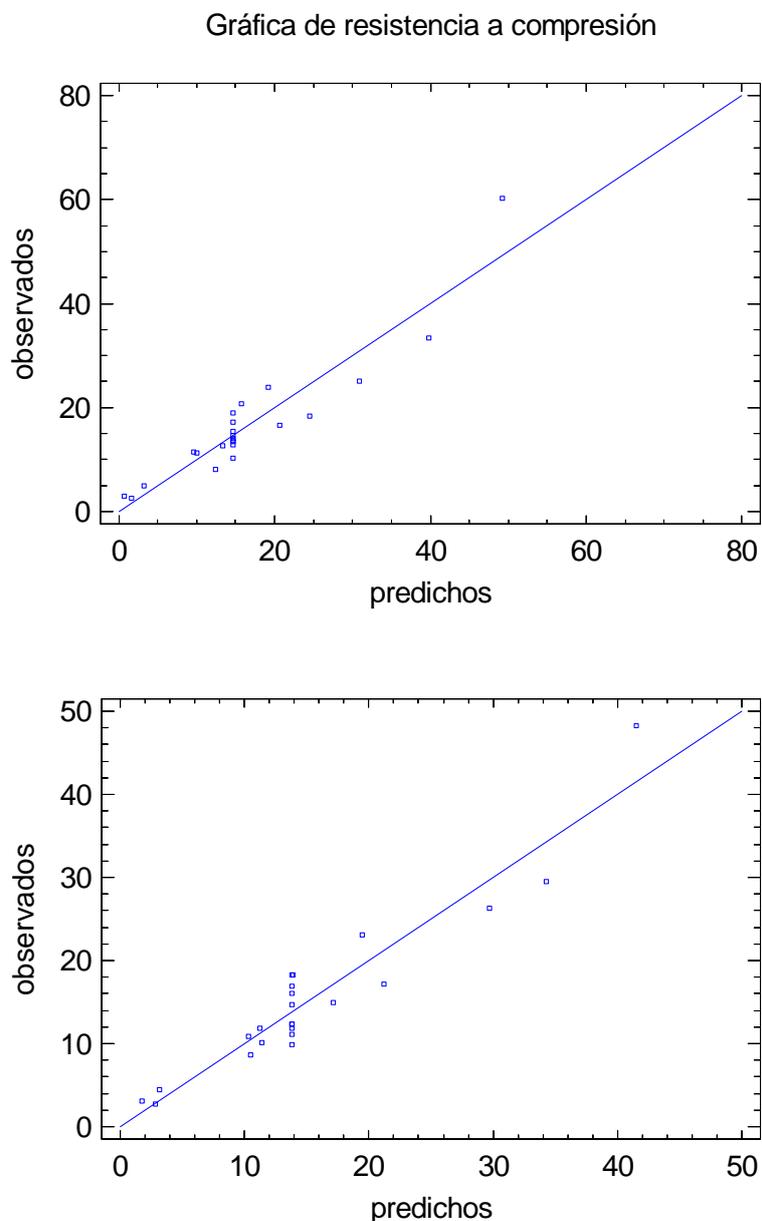


Figura 4.18.- Valores experimentales frente a los pronosticados para resistencia a compresión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

A la vista de esta figura es posible concluir que la correlación entre los datos experimentales y calculados es muy buena, de lo que se deduce que no ha habido errores experimentales significativos durante los ensayos y que el modelo es capaz de predecir de forma adecuada los resultados del experimento.

La figura 4.19 muestra las superficies de respuesta y las curvas de nivel correspondientes a la resistencia a compresión en función de los porcentajes de árido y de corcho incluidos en la formulación, manteniendo constante y en su valor central el porcentaje de caliza. Esta figura pone de relieve la tendencia hacia un máximo (sobre todo en el caso de las muestras curadas durante 120 días) al disminuir el porcentaje de corcho y aumentar el del árido.

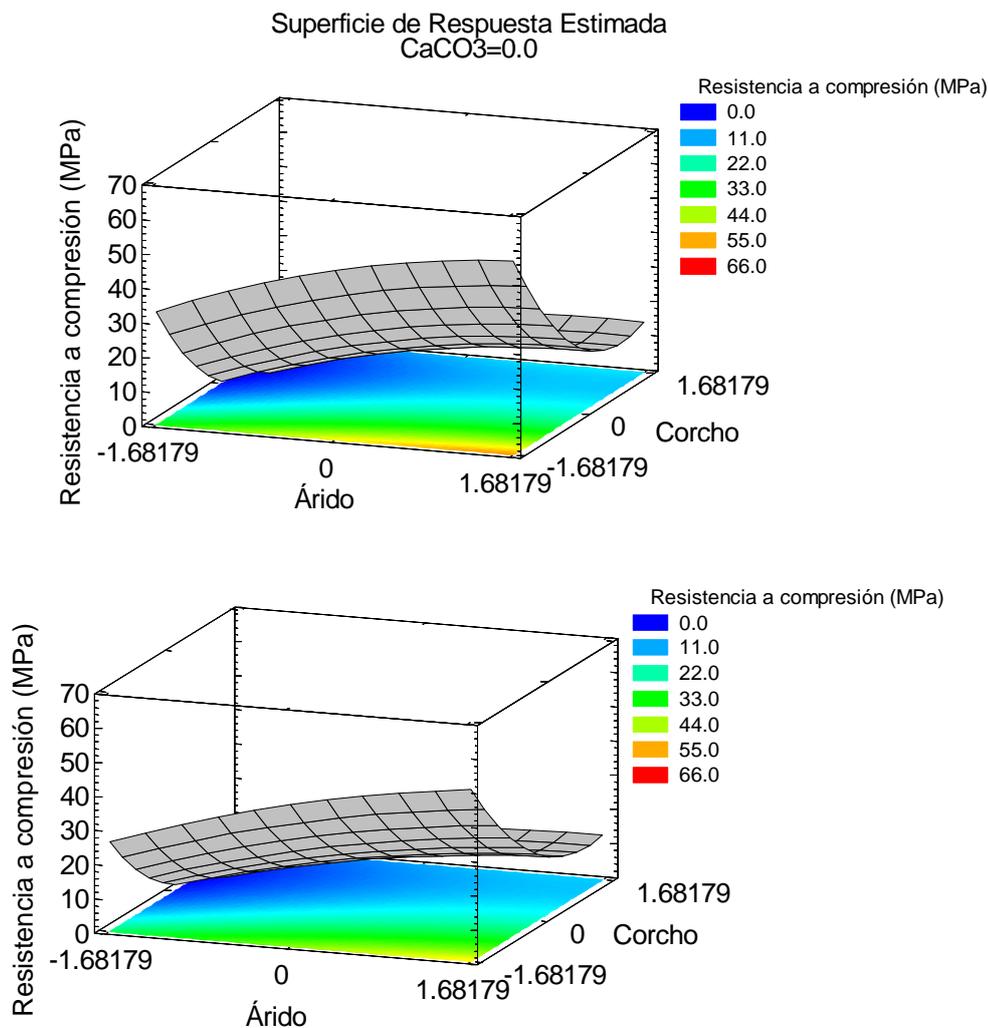


Figura 4.19.- Gráfico de superficie de respuesta y curvas de nivel para resistencia a compresión de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo). El porcentaje de CaCO<sub>3</sub> se ha mantenido en su nivel central.

Para los objetivos de este estudio se ha considerado que lo ideal es establecer un valor de resistencia a compresión cercano a los 20 MPa. Por ello, se ha considerado este valor como el óptimo del estudio y se ha determinado la combinación de valores que, a la vista del análisis estadístico, permite obtener una muestra que presente dicho óptimo. Tales valores se incluyen

en las tablas 3.11 y 3.12, que recogen los valores codificados y reales que teóricamente permiten obtener un valor de 20 MPa para la resistencia a compresión medida a 28 y 120 días, respectivamente.

Tabla 4.12.- Valores codificados y reales para la obtención de un óptimo (establecido en 20 MPa) en la resistencia a compresión. Muestras curadas durante 28 días.

Factor	Valores codificados			Valores reales		
	Bajo	Alto	Óptimo	Bajo	Alto	Óptimo
Árido	-1.68179	1.68179	0.199572	395	1405	960
Corcho	-1.68179	1.68179	-0.319344	0	134	54
CaCO3	-1.68179	1.68179	0.0848513	28	322	182
Valor óptimo = 20						

Tabla 4.13.- Valores codificados y reales para la obtención de un óptimo (establecido en 20 MPa) en la resistencia a compresión. Muestras curadas durante 120 días.

Factor	Valores codificados			Valores reales		
	Bajo	Alto	Óptimo	Bajo	Alto	Óptimo
Árido	-1.68179	1.68179	0.247431	395	1405	974
Corcho	-1.68179	1.68179	-0.426284	0	134	50
CaCO3	-1.68179	1.68179	0.0758946	28	322	182
Valor óptimo = 20						

Los valores que se incluyen en las tablas anteriores revelan que, en el caso de la resistencia a compresión, no ha sido posible obtener un óptimo dentro del intervalo de trabajo para ninguna de las tres variables, puesto que el óptimo teórico coincide, o está muy próximo, en todos los casos con alguno de los valores extremos (alto o bajo) de dichas variables.

#### 4.2.3.- Densidad

De forma análoga a la que se ha venido exponiendo, se ha llevado a cabo un análisis de la influencia de las tres variables de trabajo sobre la densidad del producto final.

La tabla 4.14 recoge los resultados de los ensayos de densidad de cada una de las muestras preparadas, tanto aquellas que se han curado durante 28 días como las curadas durante 120.

Tabla 4.14.- Resultados de los ensayos de densidad. Los tres factores de análisis en la dosificación para el estudio estadístico se muestran con sus valores codificados.

Muestra	% árido	% corcho	% CaCO <sub>3</sub>	Densidad (28 días)	Densidad (120 días)
1	0	0	-1,68179	1,70	1,65
2	1,68179	0	0	1,95	1,93
3	0	0	0	1,75	1,73
4	0	1,68179	0	1,68	1,52
5	-1	1	-1	1,34	1,30
6	0	0	1,68179	1,92	1,85
7	1	1	-1	1,79	1,78
8	0	0	0	1,84	1,83
9	0	0	0	1,86	1,81
10	1	-1	-1	1,98	1,99
11	-1	-1	-1	1,80	1,80
12	-1	-1	1	1,77	1,74
13	-1,68179	0	0	1,09	1,12
14	0	-1,68179	0	2,33	2,32
15	1	1	1	1,68	1,59
16	0	0	0	1,75	1,63
17	0	0	0	1,80	1,74
18	1	-1	1	2,04	2,03
19	0	0	0	1,86	1,83
20	-1	1	1	1,15	1,18
21	0	0	0	1,72	1,68
22	0	0	0	1,69	1,69
23	0	0	0	1,69	1,72

En primer lugar se ha procedido a analizar si existen diferencias significativas entre los valores de densidad obtenidos a ambos tiempos de curado. La figura 4.20 corresponde al diagrama de caja y bigotes para ambas series de experimentos. Ambos diagramas presentan

una gran semejanza, si bien destaca la presencia tanto de puntos “extremos” como (en el caso de las muestras curadas a 28 días) de “extremos alejados”

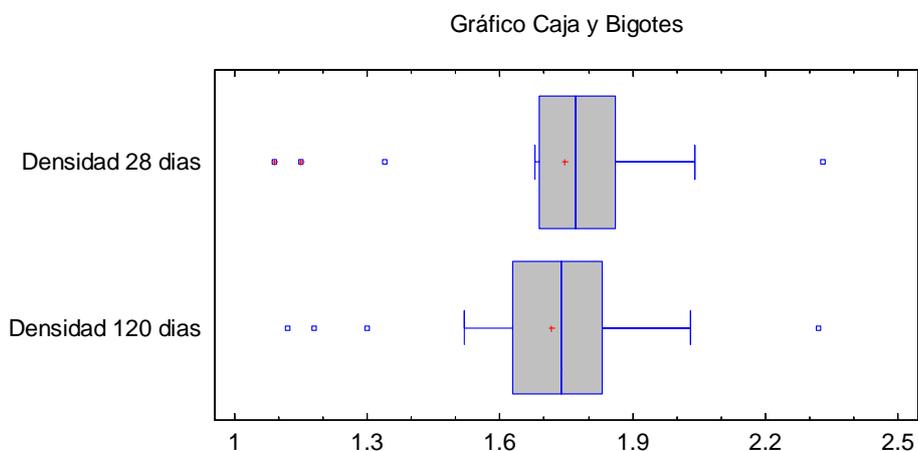


Figura 4.20.- Diagrama de caja y bigotes para las muestras curadas durante 28 y 120 días.

Por su parte, el gráfico de densidades suavizadas se representa en la figura 4.21 y confirma que existe una gran semejanza entre las dos series de datos.

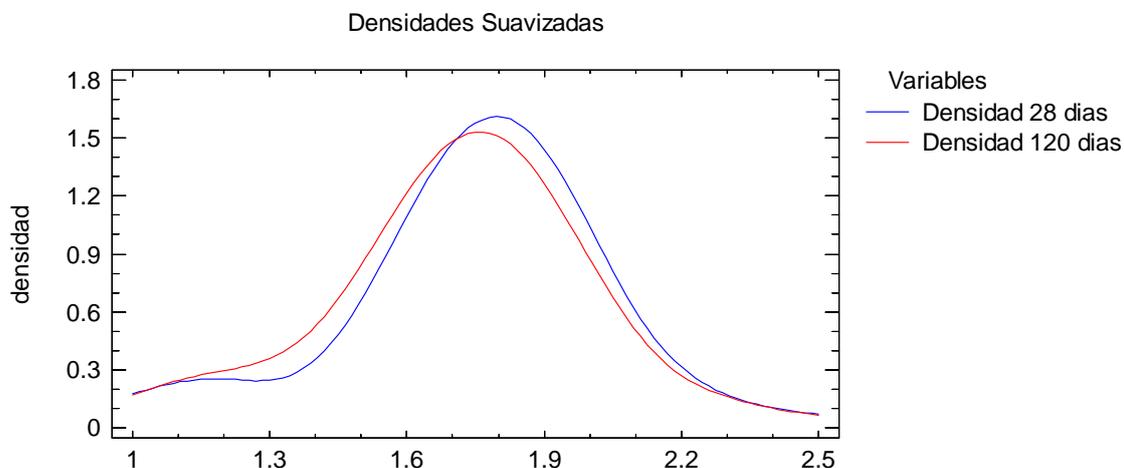


Figura 4.21.- Gráfico de densidades suavizadas para las muestras curadas durante 28 y 120 días.

Para corroborar esta afirmación se ha procedido a realizar las mismas pruebas de hipótesis que en los casos anteriores, lo que permite comparar las desviaciones estándar, las medias y las medianas de ambas series. Los resultados de esas pruebas se recogen en la tabla 4.15.

Tabla 4.15.- Test de hipótesis para la comparación de desviaciones estándar

	<i>Densidad 28 días</i>	<i>Densidad 120 días</i>
Desviación Estándar	0.266756	0.263987
Varianza	0.0711585	0.0696893
Gl	22	22

Razón de Varianzas= 1.02108

Se propone como hipótesis nula que las desviaciones estándar de ambas muestras son iguales (es decir,  $\sigma_1 = \sigma_2$ ) y como alternativa que  $\sigma_1 \neq \sigma_2$ . El estadístico  $F$  es igual a 1,02108 y el valor  $P = 0,961418$ . Por tanto no se puede rechazar la hipótesis nula para un intervalo de confianza del 95%.

Las medias de las dos muestras se han comparado mediante la Prueba  $t$  para determinar si son significativamente diferentes o no. El valor del estadístico  $t$  es igual a 0,400031, siendo el valor  $P$  de 0,691069. En consecuencia, no puede rechazarse la hipótesis nula para un intervalo de confianza del 95% y no puede rechazarse que las medias de ambas muestras sean iguales.

Finalmente, el estadístico  $W$  de Mann-Whitney (o de Wilcoxon) muestra un valor de -32,0. El valor  $P$  es de 0,488689 y, en consecuencia, tampoco puede rechazarse que las medianas de ambas muestras sean iguales.

A la vista de los tres test de hipótesis anteriores, que demuestran que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores de media, mediana y desviación estándar de las dos series, puede concluirse que no existen diferencias significativas entre los valores de densidad de ambas series de muestras. Además, la media de densidad a 120 días es ligeramente inferior que a 28 días ya que la cinética del proceso de deshidratación predomina en los resultados.

Al igual que en los casos anteriores, los datos de la tabla 4.14 se han sometido a un análisis estadístico para determinar la influencia de los porcentajes de árido, corcho y carbonato de calcio sobre la densidad. En la figura 4.22 se representa el diagrama de Pareto para este diseño. En este diagrama se aprecia una influencia muy semejante de las variables operativas sobre la variable de respuesta (en este caso, la densidad) con independencia del tiempo de

curado. Cuatro de los nueve efectos tienen una influencia estadísticamente significativa sobre la densidad de las probetas analizadas. Esas cuatro variables son las mismas (porcentaje de árido, porcentaje de corcho y sus respectivas interacciones cuadráticas) e influyen de la misma manera (negativamente el porcentaje de corcho y el cuadrado del porcentaje de árido) y positivamente el porcentaje de árido y el cuadrado del porcentaje de corcho).

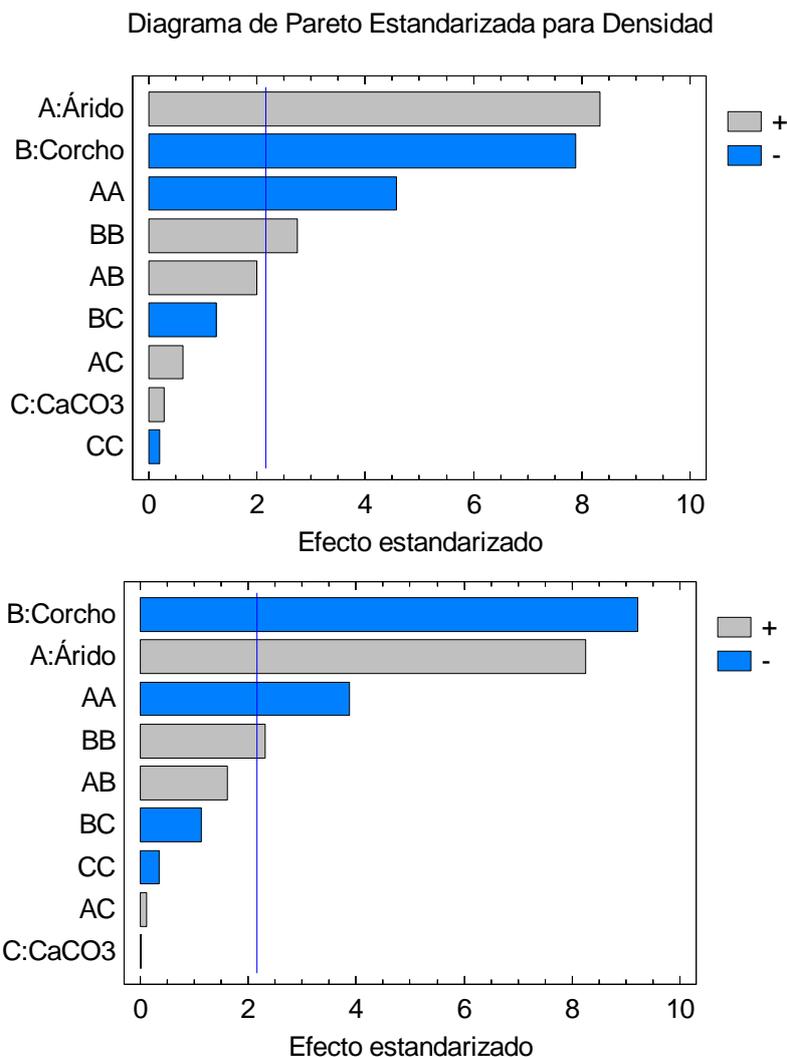


Figura 4.22.- Diagrama de Pareto para densidad de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

El test de análisis de varianza (ANOVA) permite completar, de manera numérica, la información que proporciona el diagrama de Pareto. Para las muestras curadas a 28 días, los resultados de este análisis se recogen en la tabla 4.16.

Tabla 4.16.- Análisis de varianza para las muestras curadas durante 28 días.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor P</i>
A:Árido	0,605801	1	0.605801	69.33	0.0000
B:Corcho	0,542997	1	0.542997	62.14	0.0000
C:CaCO <sub>3</sub>	0,000732143	1	0.000732143	0.08	0.7768
AA	0,182491	1	0.182491	20.88	0.0005
AB	0,0351125	1	0.0351125	4.02	0.0663
AC	0,0036125	1	0.0036125	0.41	0.5314
BB	0,0657046	1	0.0657046	7.52	0.0168
BC	0,0136125	1	0.0136125	1.56	0.2340
CC	0,000341797	1	0.000341797	0.04	0.8463
Error total	0,113598	13	0.00873829		
Total (corr,)	1,56549	22			

R-cuadrada = 92,7436%; R-cuadrada (ajustada por g,l,) = 87,72%; Error estándar del estimado = 0,0934788; Error absoluto medio = 0,061105; Estadístico Durbin-Watson = 2,11395 (P=0,6227)

Se aprecia en esta tabla que tanto el porcentaje de árido como el de corcho, así como sus respectivas interacciones cuadráticas, presentan un valor P por debajo de 0,05, lo que significa que ejercen sobre la variable objetivo un efecto estadísticamente significativo. Además, el valor de R-cuadrada sugiere que el modelo propuesto ajusta de manera muy aceptable los datos experimentales, tal como se verá gráficamente más adelante. El estadístico de Durbin-Watson (2.11395) y su correspondiente valor P (0.6227) indican que no existe autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significatividad del 95%.

Los resultados del test de ANOVA para las muestras curadas durante 120 días se resumen en la tabla 4.17.

Tabla 4.17.- Análisis de varianza para las muestras curadas durante 120 días.

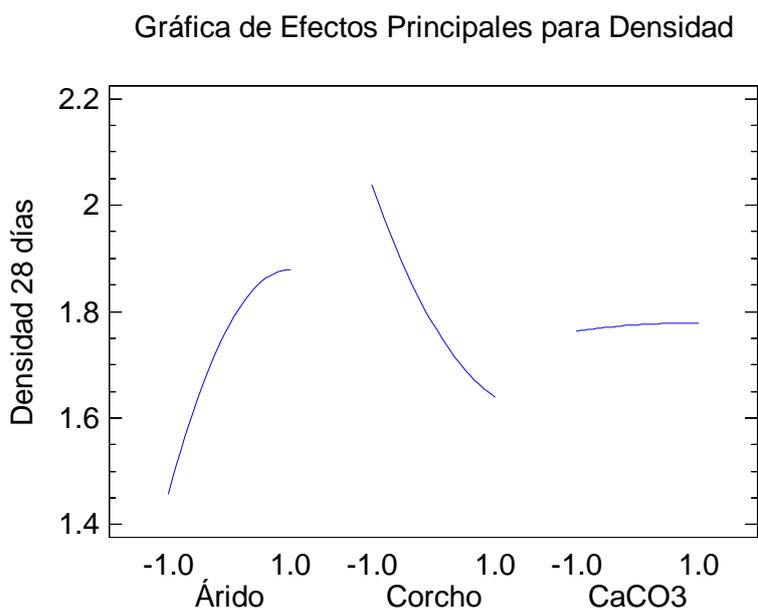
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor P</i>
A:Árido	0,546627	1	0,546627	67,93	0,0000
B:Corcho	0,683589	1	0,683589	84,94	0,0000
C:CaCO <sub>3</sub>	0,00000296	1	0,00000296	0,00	0,9850
AA	0,121375	1	0,121375	15,08	0,0019
AB	0,0210125	1	0,0210125	2,61	0,1301

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor P
AC	0,0001125	1	0,0001125	0,01	0,9077
BB	0,0433849	1	0,0433849	5,39	0,0371
BC	0,0105125	1	0,0105125	1,31	0,2737
CC	0,000979277	1	0,000979277	0,12	0,7328
Error total	0,104617	13	0,00804749		
Total (corr,)	1,53317	22			

R-cuadrada = 93,1764%; R-cuadrada (ajustada por g,l,) = 88,4523%; Error estándar del estimado = 0,0897078; Error absoluto medio = 0,0571889; Estadístico Durbin-Watson = 1,90544 (P=0,4321)

Lo mismo que se acaba de exponer sobre el test de ANOVA para las muestras curadas durante 28 días es válido para las muestras curadas durante 120 días.

En la figura 4.23 se representan los gráficos de efectos principales.



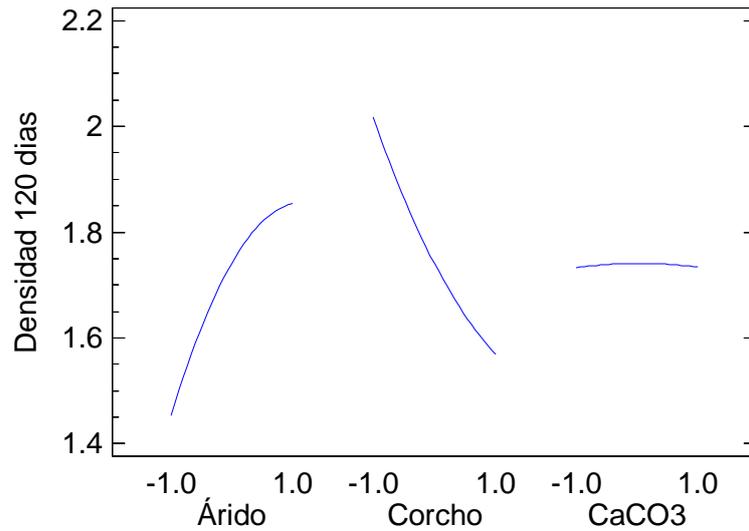


Figura 4.23.- Gráfico de efectos principales para densidad de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

En esta figura se puede apreciar que, en ambos casos, se apunta la presencia de un máximo en la densidad para valores de porcentaje de árido próximos a +1. También se observa que el aumento del porcentaje de corcho hace disminuir drásticamente la densidad de las muestras, sin que llegue a apreciarse óptimo. Por último, la influencia del porcentaje de caliza en la mezcla no parece ser relevante.

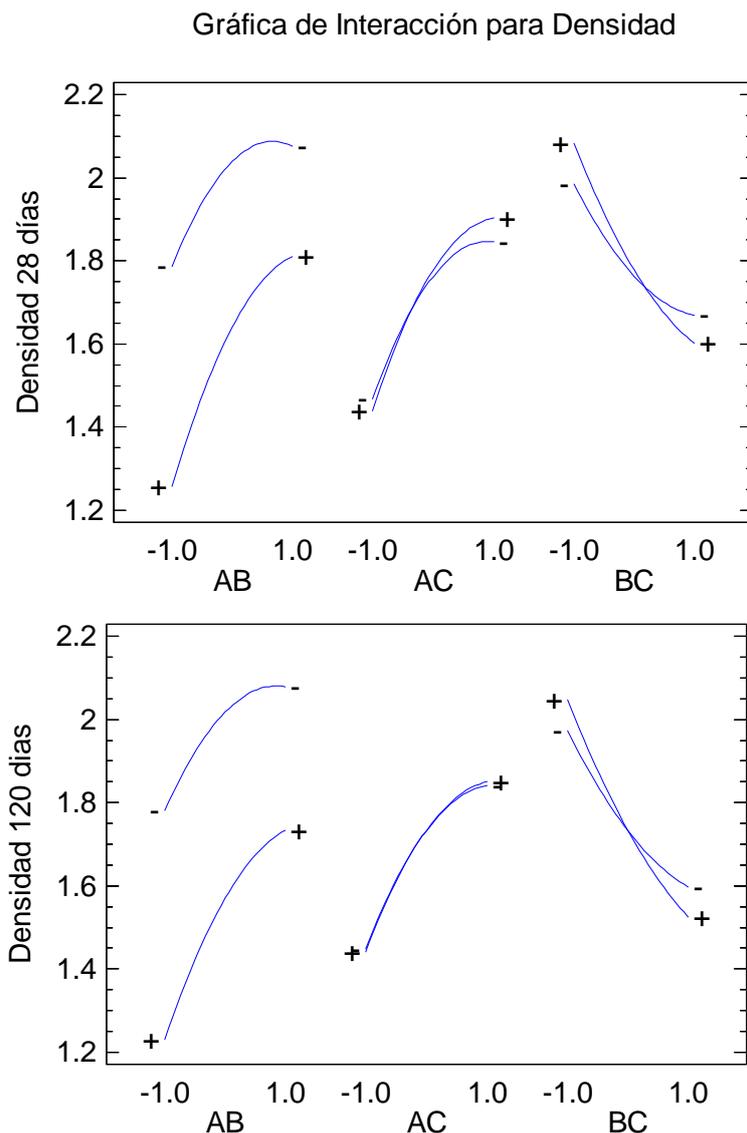


Figura 4.24.- Gráfico de interacción para densidad de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

El gráfico de interacciones de la figura 4.24 pone de manifiesto que, con independencia del tiempo de curado, no existe interacción a lo largo del intervalo de trabajo entre los porcentajes de árido y corcho. Por el contrario, se aprecia una importante interacción entre los porcentajes de árido y caliza así como entre los de corcho y caliza, cuyas gráficas presentan una clara intersección.

Como viene siendo habitual, se han calculado los coeficientes del polinomio que ajusta los valores experimentales. Para las muestras curadas durante 28 días, la ecuación es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{Densidad (28 días)} = & 1,77516 + 0,210615 \cdot \text{Árido} - 0,199399 \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 0,00732189 \cdot \text{CaCO}_3 - 0,107169 \cdot \text{Árido}^2 + 0,06625 \cdot \text{Árido} \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 0,02125 \cdot \text{Árido} \cdot \text{CaCO}_3 + 0,0643051 \cdot \text{Corcho}^2 - 0,04125 \cdot \text{Corcho} \cdot \text{CaCO}_3 - \\
 & - 0,00463801 \cdot (\text{CaCO}_3)^2
 \end{aligned} \quad [4.12]$$

Por su parte, para los resultados obtenidos tras curar durante 120 días la ecuación de correlación es:

$$\begin{aligned}
 \text{Densidad (120 días)} = & 1,74118 + 0,200065 \cdot \text{Árido} - 0,223729 \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 0,000465554 \cdot \text{CaCO}_3 - 0,0874003 \cdot \text{Árido}^2 + 0,05125 \cdot \text{Árido} \cdot \text{Corcho} + \\
 & + 0,00375 \cdot \text{Árido} \cdot \text{CaCO}_3 + 0,0522537 \cdot \text{Corcho}^2 - 0,03625 \cdot \text{Corcho} \cdot \text{CaCO}_3 - \\
 & - 0,00785056 \cdot (\text{CaCO}_3)^2
 \end{aligned} \quad [4.13]$$

El signo positivo o negativo de cada uno de los coeficientes de las ecuaciones [4.12] y [4.13], como ya se ha indicado, ponen de manifiesto el sentido y la influencia de un determinado efecto o la interacción entre dos efectos sobre la variable objetivo (densidad).

A semejanza de lo que se ha hecho en los restantes casos, se han eliminado del análisis los efectos no significativos, lo que da lugar a las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \text{Densidad (28 días)} = & 1,77237 + 0,210615 \cdot \text{Árido} - 0,199399 \cdot \text{Corcho} - \\
 & - 0,107137 \cdot \text{Árido}^2 + 0,0643372 \cdot \text{Corcho}^2
 \end{aligned} \quad [4.14]$$

Y

$$\begin{aligned}
 \text{Densidad (120 días)} = & 1,73646 + 0,200065 \cdot \text{Árido} - 0,223729 \cdot \text{Corcho} - \\
 & - 0,0873461 \cdot \text{Árido}^2 + 0,052308 \cdot \text{Corcho}^2
 \end{aligned} \quad [4.15]$$

La figura 4.25 muestra la representación gráfica de los valores observados para la densidad frente a los valores predichos por las ecuaciones [4.12] y [4.13].

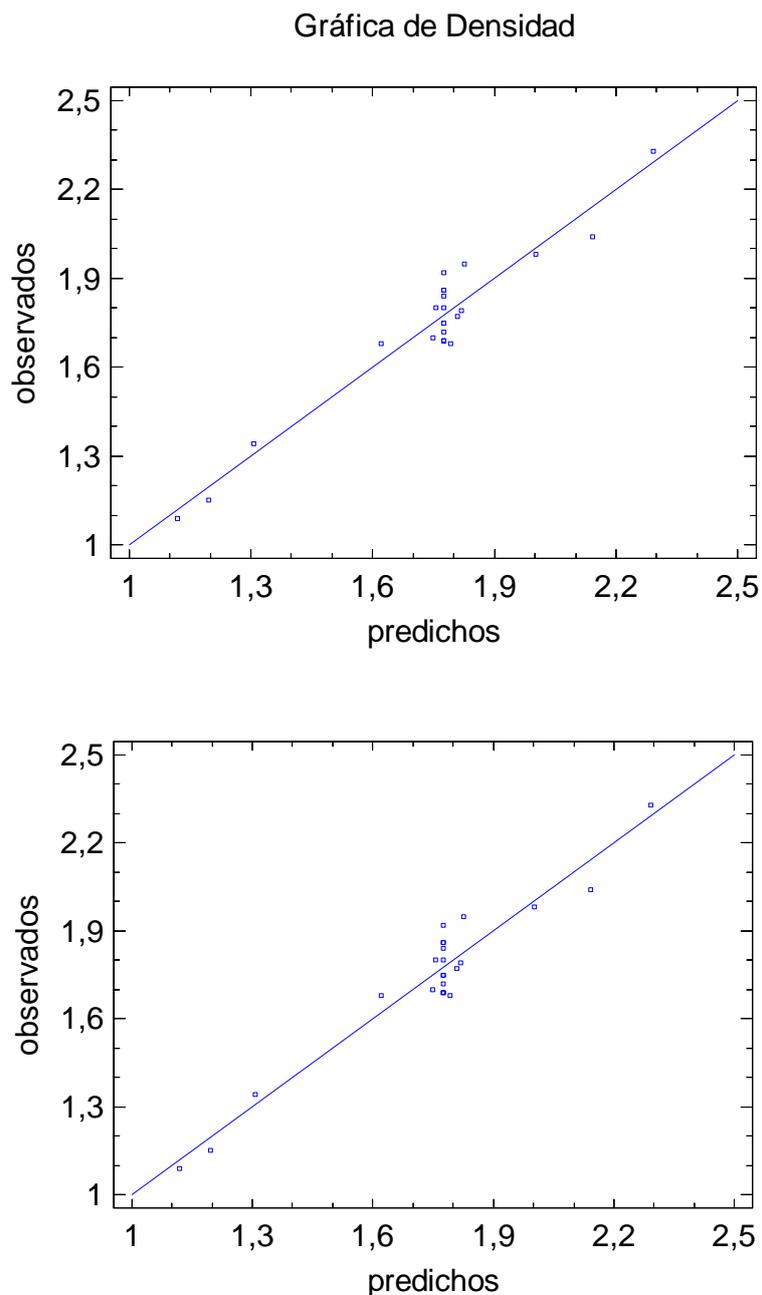


Figura 4.25.- Valores experimentales frente a los pronosticados para densidad de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo).

Esta figura pone de manifiesto que existe una muy buena correlación entre los datos experimentales y calculados, por lo que puede afirmarse que el modelo es capaz de predecir de forma adecuada los resultados del experimento.

La figura 4.26 muestra las superficies de respuesta y las curvas de nivel correspondientes a la densidad en función de los porcentajes de árido y de corcho incluidos en la formulación,

manteniendo el porcentaje de caliza constante y en su valor central. Esta figura pone de relieve la tendencia hacia un mínimo en la densidad (zona coloreada en verde en las curvas de nivel) al aumentar el porcentaje de corcho y disminuir el del árido.

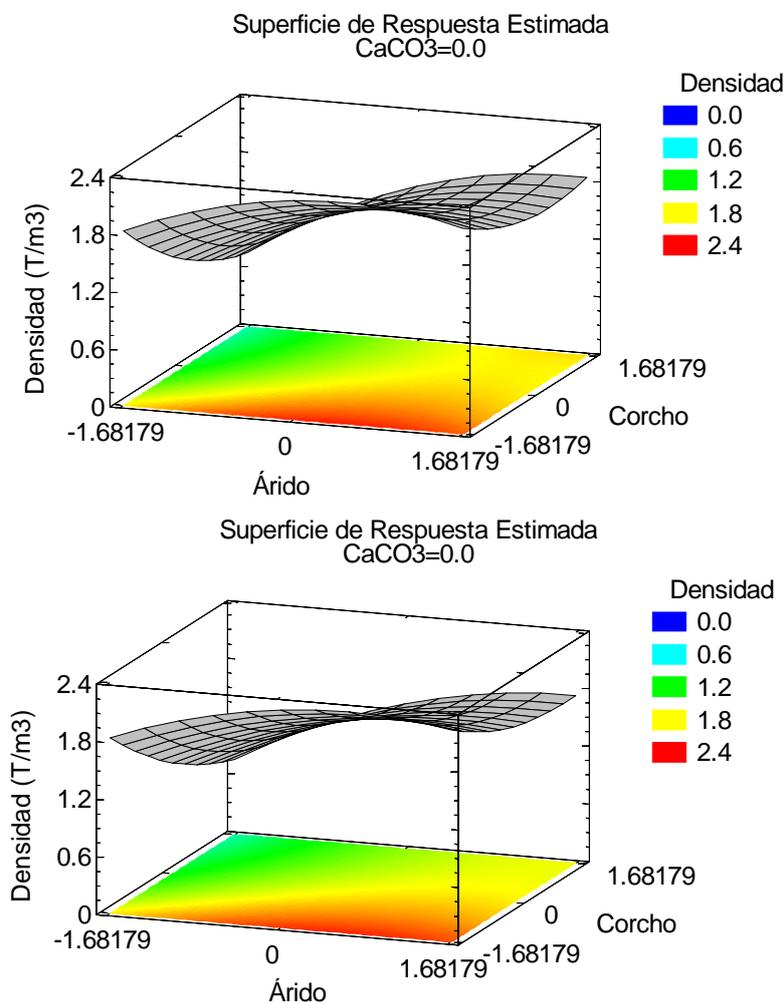


Figura 4.26.- Gráfico de superficie de respuesta y curvas de nivel para densidad de las muestras tras 28 días de curado (arriba) y tras 120 días de curado (abajo). El porcentaje de CaCO<sub>3</sub> se ha mantenido en su nivel central.

Para los objetivos de este estudio se ha considerado que lo ideal es establecer un valor de densidad en torno a 1,2 T/m<sup>3</sup>. Por ello, se ha considerado este valor como el óptimo del estudio y se ha determinado la combinación de valores que, a la vista del análisis estadístico, permite obtener una muestra que presente dicho óptimo. Tales valores se incluyen en las tablas 3.17 y 3.18, que recogen los valores codificados y reales que teóricamente permiten obtener un valor de 1,2 T/m<sup>3</sup> para la densidad medida a 28 y 120 días, respectivamente.

Tabla 4.18.- Valores codificados y reales para la obtención de un óptimo (1,2 T/m<sup>3</sup>) en la densidad. Muestras curadas durante 28 días.

<i>Factor</i>	Valores codificados			Valores reales		
	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Árido	-1.68179	1.68179	-0.99244	395	1405	602
Corcho	-1.68179	1.68179	0.995664	0	134	107
CaCO3	-1.68179	1.68179	1.01336	28	322	264
Valor óptimo = 1.2						

Tabla 4.19.- Valores codificados y reales para la obtención de un óptimo (1,2 T/m<sup>3</sup>) en la densidad. Muestras curadas durante 120 días.

<i>Factor</i>	Valores codificados			Valores reales		
	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Árido	-1.68179	1.68179	-1.18233	395	1405	545
Corcho	-1.68179	1.68179	0.687132	0	134	95
CaCO3	-1.68179	1.68179	0.370198	28	322	207
Valor óptimo = 1.2						

De nuevo, y tal como hacía prever el gráfico de efectos principales, los valores que se incluyen en las tablas anteriores ponen de manifiesto que, en el caso de la densidad, tampoco ha sido posible obtener un óptimo dentro del intervalo de trabajo para ninguna de las tres variables, puesto que el óptimo teórico coincide, o está muy próximo, en todos los casos con alguno de los valores extremos (alto o bajo) de dichas variables.

#### 4.2.4.- Coeficiente de transmisión térmica

De forma análoga a la que se ha venido exponiendo, se ha llevado a cabo un análisis de la influencia de las tres variables de trabajo sobre el coeficiente de transmisión térmica (CTT) del producto final.

La tabla 4.20 recoge los resultados de los ensayos de coeficiente de transmisión térmica de cada una de las muestras preparadas. En este caso, el análisis sólo se ha realizado a las muestras curadas durante 28 días.

Tabla 4.20.- Resultados de los ensayos de coeficiente de transmisión térmica. Los tres factores de análisis en la dosificación para el estudio estadístico se muestran con sus valores codificados.

Muestra	% árido	% corcho	% CaCO <sub>3</sub>	Coeficiente de transmisión térmica (W/m·K)
1	0	0	-1,68179	1,016
2	1,68179	0	0	1,846
3	0	0	0	0,821
4	0	1,68179	0	0,801
5	-1	1	-1	0,530
6	0	0	1,68179	1,639
7	1	1	-1	1,199
8	0	0	0	1,091
9	0	0	0	1,044
10	1	-1	-1	1,956
11	-1	-1	-1	1,268
12	-1	-1	1	1,13
13	-1,68179	0	0	0,349
14	0	-1,68179	0	3,142
15	1	1	1	0,918
16	0	0	0	1,148
17	0	0	0	1,265
18	1	-1	1	1,989
19	0	0	0	1,102
20	-1	1	1	0,43
21	0	0	0	1,125
22	0	0	0	0,942
23	0	0	0	0,849

Al igual que en los casos anteriores, los datos de la tabla 4.20 se han sometido a un análisis estadístico para determinar la influencia de los porcentajes de árido, corcho y carbonato de calcio sobre el coeficiente de transmisión térmica. En la figura 4.27 se representa el diagrama

de Pareto para este diseño. Tres de los nueve efectos tienen una influencia estadísticamente significativa sobre el coeficiente de transmisión térmica de las probetas analizadas. Esas tres variables son las mismas (porcentaje de árido, porcentaje de corcho y la interacción cuadrática de este último), influyendo negativamente el porcentaje de corcho y positivamente el porcentaje de árido y el cuadrado del porcentaje de corcho.

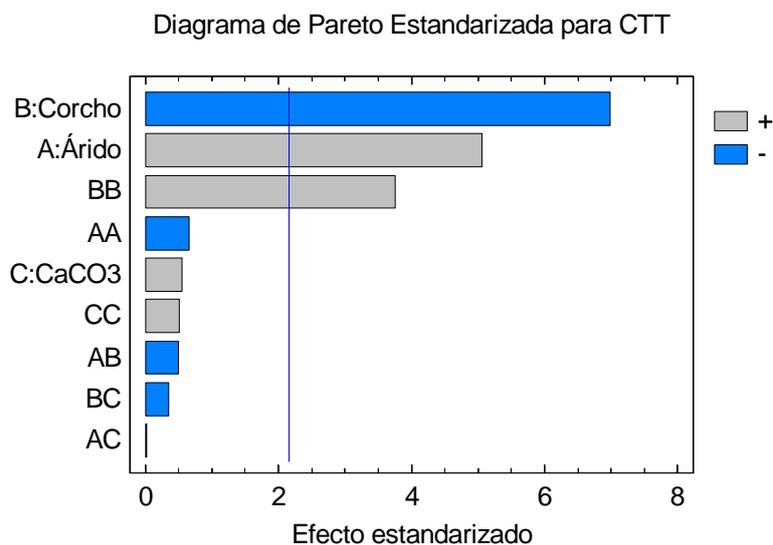


Figura 4.27.- Diagrama de Pareto para coeficiente de transmisión térmica de las muestras tras 28 días de curado.

El test de análisis de varianza (ANOVA) permite completar, de manera numérica, la información que proporciona el diagrama de Pareto. Para el coeficiente de transmisión térmica, los resultados de este análisis se recogen en la tabla 4.31.

Tabla 4.21.- Análisis de varianza para las muestras estudiadas.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor P
A:Árido	1,99647	1	1,99647	25,63	0,0002
B:Corcho	3,79914	1	3,79914	48,77	0,0000
C:CaCO <sub>3</sub>	0,023107	1	0,023107	0,30	0,5952
AA	0,0332779	1	0,0332779	0,43	0,5247
AB	0,0190125	1	0,0190125	0,24	0,6295
AC	0,0000125	1	0,0000125	0,00	0,9901
BB	1,10107	1	1,10107	14,14	0,0024

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor P
BC	0,009522	1	0,009522	0,12	0,7322
CC	0,0200848	1	0,0200848	0,26	0,6201
Error total	1,01259	13	0,0778915		
Total (corr,)	8,01535	22			

R-cuadrada = 87,3669 %; R-cuadrada (ajustada por g,l,) = 78,6208 %; Error estándar del estimado = 0,279091; Error absoluto medio = 0,16594; Estadístico Durbin-Watson = 2,18191 (P=0,6811)

Se aprecia en esta tabla que tanto el porcentaje de árido como el de corcho, así como la interacción cuadrática de este último, presentan un valor P por debajo de 0,05, lo que significa que ejercen sobre la variable objetivo un efecto estadísticamente significativo. Además, el valor de R-cuadrada sugiere que el modelo propuesto ajusta de manera bastante aceptable los datos experimentales, tal como se verá gráficamente más adelante. El estadístico de Durbin-Watson (2,18191) y su correspondiente valor P (0,6811) indican que no existe autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significatividad del 95%.

En la figura 4.28 se representan los gráficos de efectos principales.

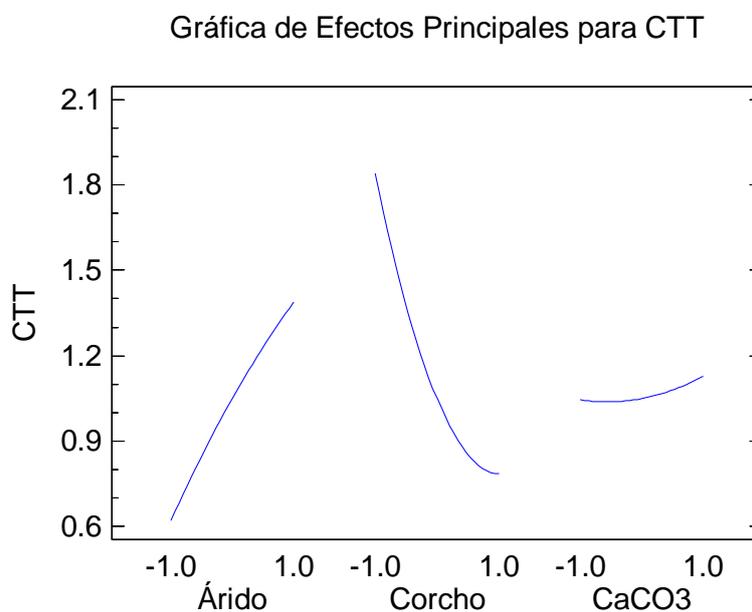


Figura 4.28.- Gráfico de efectos principales para coeficiente de transmisión térmica de las muestras tras 28 días de curado.

En esta figura se puede apreciar la tendencia hacia un máximo en el coeficiente de transmisión térmica para valores de porcentaje de árido próximos a +1. También se observa que el aumento del porcentaje de corcho hace disminuir drásticamente el coeficiente de transmisión térmica de las muestras, apuntándose un mínimo hacia valores de porcentaje de corcho próximo a +1. Por último, tal como ya se ha apreciado anteriormente, la influencia del porcentaje de caliza en la mezcla no parece ser relevante.

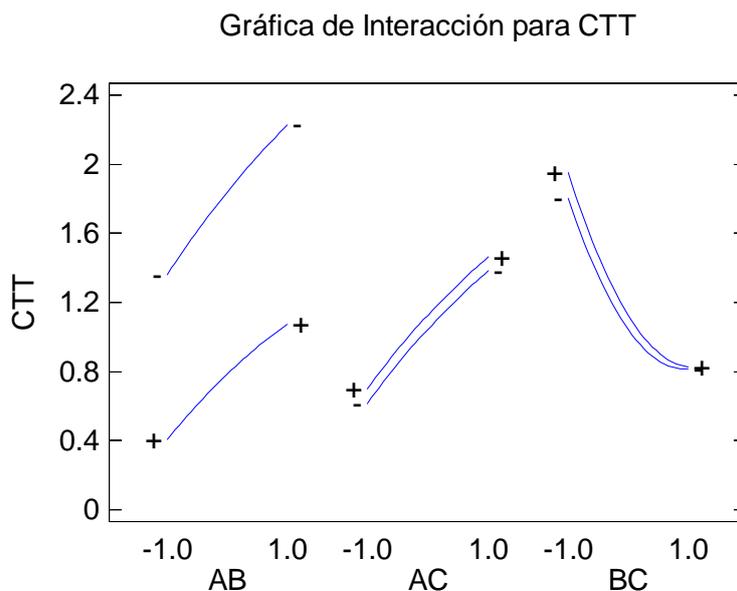


Figura 4.29.- Gráfico de interacción para coeficiente de transmisión térmica de las muestras tras 28 días de curado.

El gráfico de interacciones de la figura 4.29 pone de manifiesto que no existe interacción a lo largo del intervalo de trabajo entre ninguna de las variables. Únicamente en el caso del corcho y el carbonato se apunta una leve interacción en el tramo más alto de los intervalos de trabajo.

Como viene siendo habitual, se han calculado los coeficientes del polinomio que ajusta los valores experimentales. Para el caso del CTT la ecuación es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{CTT} = & 1.04976 + 0.382346 \cdot \text{Árido} - 0.527433 \cdot \text{Corcho} + 0.0411336 \cdot \text{CaCO}_3 - \\
 & - 0.0457642 \cdot \text{Árido}^2 - 0.04875 \cdot \text{Árido} \cdot \text{Corcho} - 0.00125 \cdot \text{Árido} \cdot \text{CaCO}_3 + \quad [4.16] \\
 & + 0.263243 \cdot \text{Corcho}^2 - 0.0345 \cdot \text{Corcho} \cdot \text{CaCO}_3 + 0.0355534 \cdot (\text{CaCO}_3)^2
 \end{aligned}$$

El signo positivo o negativo de cada uno de los coeficientes de la ecuación [4.16], como se ha venido indicando, pone de manifiesto el sentido y la influencia de un determinado efecto o la interacción entre dos efectos sobre la variable objetivo (coeficiente de transmisión térmica).

A semejanza de lo que se ha hecho en los restantes casos, se han eliminado del análisis los efectos no significativos, lo que da lugar a la siguiente ecuación:

$$CTT = 1.04365 + 0.382346 \cdot \text{Árido} - 0.527433 \cdot \text{Corcho} + 0.263313 \cdot \text{Corcho}^2 \quad [4.17]$$

La figura 4.30 muestra la representación gráfica de los valores observados para el coeficiente de transmisión térmica frente a los valores predichos por la ecuación [4.16].

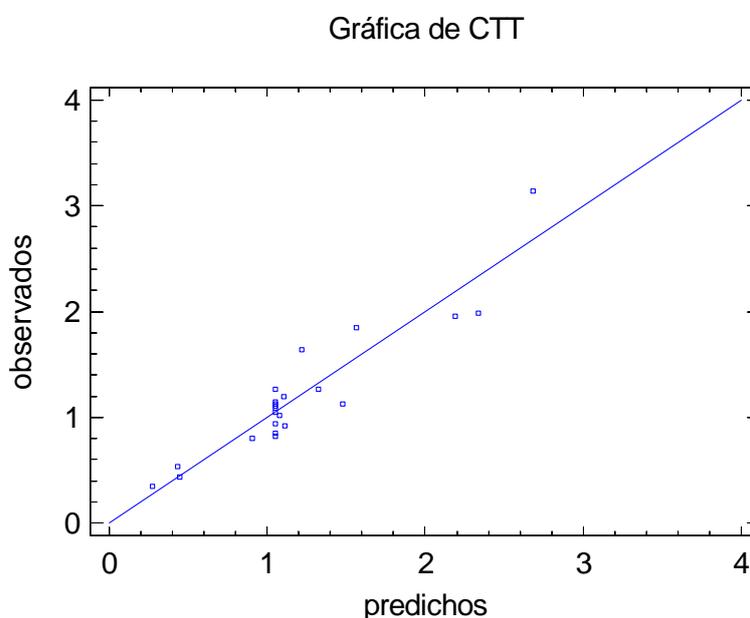


Figura 4.30.- Valores experimentales frente a los pronosticados para coeficiente de transmisión térmica de las muestras estudiadas.

Esta figura pone de manifiesto que existe una muy buena correlación entre los datos experimentales y calculados, por lo que puede afirmarse que el modelo es capaz de predecir de forma adecuada los resultados del experimento.

La figura 4.31 muestra las superficies de respuesta y las curvas de nivel correspondientes al coeficiente de transmisión térmica en función de los porcentajes de árido y de corcho incluidos en la formulación, manteniendo el porcentaje de caliza constante y en su valor central. Esta

figura pone de relieve la tendencia hacia un mínimo (óptimo) en el coeficiente de transmisión térmica (zona coloreada en azul intenso en las curvas de nivel) al aumentar el porcentaje de corcho y disminuir el del árido.

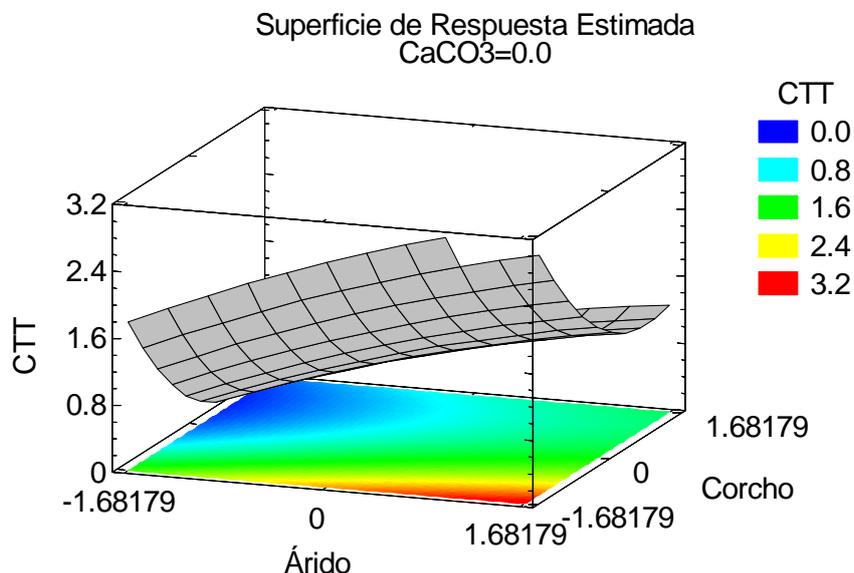


Figura 4.31.- Gráfico de superficie de respuesta y curvas de nivel para el coeficiente de transmisión térmica de las muestras Estudiadas. El porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  se ha mantenido en su nivel central.

Lo que acaba de afirmarse se corrobora a la vista de la tabla 4.22, que recoge los valores codificados y reales que teóricamente permiten obtener un óptimo (en este caso, un mínimo) para el coeficiente de transmisión térmica medida a 28 y 120 días, respectivamente.

Tabla 4.22.- Valores codificados y reales para la obtención de un óptimo (0.0 W/m·K) en el coeficiente de transmisión térmica. Muestras curadas durante 28 días.

Factor	Valores codificados			Valores reales		
	Bajo	Alto	Óptimo	Bajo	Alto	Óptimo
Árido	-1.68179	1.68179	-1.68179	395	1405	395
Corcho	-1.68179	1.68179	0.832754	0	134	100
CaCO3	-1.68179	1.68179	-0.204184	28	322	157
Valor óptimo = 0.0874164						

De nuevo, y tal como hacía prever el gráfico de efectos principales, los valores que se incluyen en las tablas anteriores ponen de manifiesto que, en el caso del coeficiente de transmisión térmica, no ha sido posible obtener un óptimo dentro del intervalo de trabajo para el contenido de árido, pero sí para el de corcho y carbonato de calcio.

#### 4.2.5.- Coeficiente de extinción de ruido

Al igual que con las restantes variables de respuesta, se ha llevado a cabo un análisis de la influencia de las tres variables de trabajo sobre el coeficiente de extinción de ruido del producto final.

La tabla 4.23 recoge los resultados de los ensayos de coeficiente de extinción de ruido de cada una de las muestras preparadas, curadas durante 28 días.

Tabla 4.23.- Resultados de los ensayos de coeficiente de extinción de ruido. Los tres factores de análisis en la dosificación para el estudio estadístico se muestran con sus valores codificados.

Muestra	% árido	% corcho	% CaCO <sub>3</sub>	Coeficiente de extinción de ruido (adimensional)
1	0	0	-1,68179	0,2
2	1,68179	0	0	0,15
3	0	0	0	0,2
4	0	1,68179	0	0,2
5	-1	1	-1	0,3
6	0	0	1,68179	0,2
7	1	1	-1	0,25
8	0	0	0	0,15
9	0	0	0	0,2
10	1	-1	-1	0,15
11	-1	-1	-1	0,15
12	-1	-1	1	0,1
13	-1,68179	0	0	0

Muestra	% árido	% corcho	% CaCO <sub>3</sub>	Coefficiente de extinción de ruido (adimensional)
14	0	-1,68179	0	0,1
15	1	1	1	0
16	0	0	0	0,15
17	0	0	0	0,2
18	1	-1	1	0,15
19	0	0	0	0,15
20	-1	1	1	0,25
21	0	0	0	0,2
22	0	0	0	0,2
23	0	0	0	0,2

Al igual que en los casos anteriores, los datos de la tabla 4.23 se han sometido a un análisis estadístico para determinar la influencia de los porcentajes de árido, corcho y carbonato de calcio sobre el coeficiente de extinción de ruido. En la figura 4.32 se representa el diagrama de Pareto para este diseño.

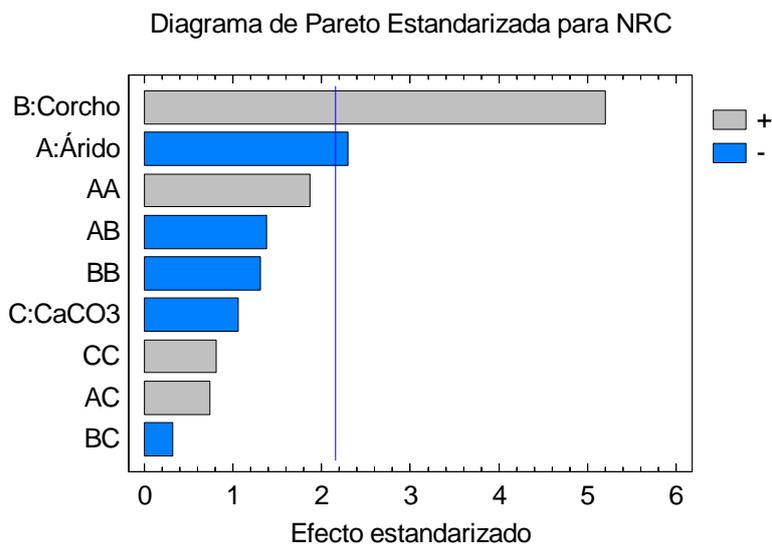


Figura 4.32.- Diagrama de Pareto para coeficiente de extinción de ruido de las muestras tras

28 días de curado.

En este diagrama se aprecia que únicamente el porcentaje de corcho y el de árido ejercen un efecto estadísticamente significativo sobre el coeficiente de extinción de ruidos, siendo ésta positiva en el caso del corcho y negativa en el del árido. No obstante, en ningún caso (de acuerdo con los valores de la tabla 4.33) el coeficiente de extinción de ruidos supera el valor de 0,3, lo que hace que las muestras así preparadas carezcan de interés práctico a la hora de ser empleadas como aislantes acústicos que mejoren las propiedades de un hormigón convencional.

A la misma conclusión se llega a la vista de los valores recogidos en la tabla 4.24, correspondientes al test de análisis de varianza (ANOVA)

Tabla 4.24.- Análisis de varianza para las muestras curadas durante 28 días.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Árido	0.00583411	1	0.00583411	5.28	0.0388
B:Corcho	0.0298219	1	0.0298219	27.00	0.0002
C:CaCO3	0.00123748	1	0.00123748	1.12	0.3091
AA	0.00385542	1	0.00385542	3.49	0.0844
AB	0.0021125	1	0.0021125	1.91	0.1900
AC	0.0006125	1	0.0006125	0.55	0.4697
BB	0.00190155	1	0.00190155	1.72	0.2122
BC	0.0001125	1	0.0001125	0.10	0.7547
CC	0.000721412	1	0.000721412	0.65	0.4335
Error total	0.0143597	13	0.00110459		
Total (corr.)	0.0606	22			

R-cuadrada = 76.3042 %; R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 59.8993%; Error estándar del estimado = 0.0332354; Error absoluto medio = 0.0219691; Estadístico Durbin-Watson = 2.19352 (P= 0.6907)

En esta tabla se aprecia, además, que el modelo no ajusta satisfactoriamente los datos experimentales, existiendo una gran dispersión entre los datos predichos por tal modelo y los determinados experimentalmente, tal como se puede concluir a la vista de la figura 4.33.

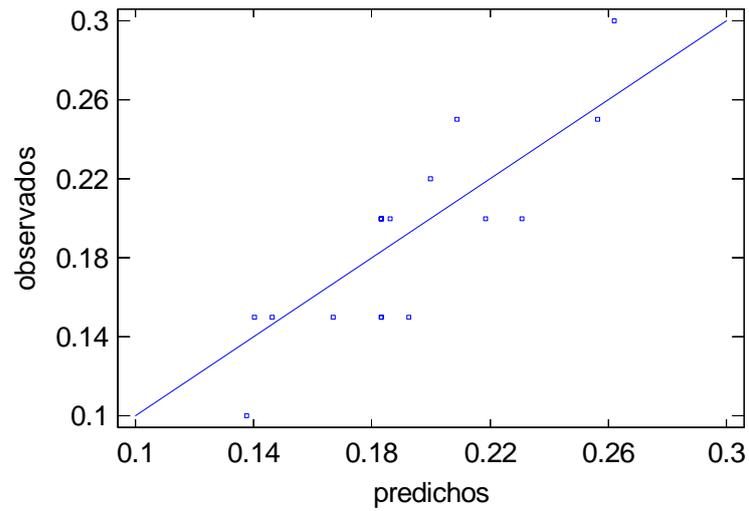


Figura 4.33.- Valores experimentales frente a los pronosticados para coeficiente de extinción de ruido de las muestras tras 28 días de curado.

Por todo lo expuesto, no se ha considerado de interés continuar con el análisis estadístico de los datos de coeficiente de extinción de ruido.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en la presente Memoria, una vez discutidos y comparados con otros previamente recogidos en la bibliografía se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Primera: La técnica de microscopía pone de manifiesto que se ha conseguido un buen grado de cohesión entre las partículas de cemento y corcho. Las muestras preparadas han cumplido con el objetivo inicial de lograr una adecuada dispersión del residuo de corcho en el seno de la mezcla.
- Segunda: La técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) permite observar que existe una evidente separación entre las partículas de corcho, estando el espacio entre ellas ocupado por la pasta de mortero y por el carbonato cálcico. Además, se aprecia una perfecta unión entre corcho y la pasta de mortero a través precisamente del carbonato. Por último, cabe destacar la ausencia de deformación que existe en las zonas sanas del corcho tras la rotura por compresión.
- Tercera: En las muestras que fueron sometidas a ensayos a compresión, la técnica de SEM revela la presencia de roturas en forma de “venas en escalera” (también conocidas por su denominación en francés, *feintes en échelon*), lo que indica la existencia de un esfuerzo en el mismo sentido en la pasta de mortero (esfuerzo que puede considerarse causado por la cizalla). Además, también en ese sentido se observa la presencia de una importante deformación de las células de corcho.
- Cuarta: Los espectros de EDX muestran la presencia de elementos como silicio, aluminio, oxígeno, hierro y calcio, todos ellos compatibles con la presencia de aluminosilicatos en las distintas muestras. Además, aparece también un pico correspondiente al carbono. Puesto que los microanálisis de EDX se realizaron en la interfase corcho-carbonato, ese carbono se puede atribuir al carbonato de calcio que se introdujo en la formulación. En todos los casos, el elemento predominante en la muestra es el oxígeno, seguido por el calcio. Las muestras también presentan contenidos menores de Si, lo que sugiere la presencia de silicatos (o aluminosilicatos) en la mezcla.

- Quinta: El test de hipótesis realizado a las muestras ensayadas revela que no existen diferencias significativas entre los valores de resistencia a flexión determinados para las muestras que fueron curadas durante 28 y 120 días. Esta afirmación es de particular interés puesto que pone de manifiesto dos fenómenos relevantes. En primer lugar, revela que el hormigón modificado tiene un comportamiento igual (o al menos muy semejante) al del hormigón convencional en lo referente al incremento de resistencia. En segundo lugar, pone de manifiesto que la inclusión de un elemento extraño al hormigón, como es el corcho, no está ejerciendo ningún tipo de efecto negativo en los valores de resistencia al prolongarse el tiempo de curado, es decir, no parece afectar a la durabilidad.
  
- Sexta: La gráfica de superficie de respuesta apunta la tendencia hacia un máximo en la resistencia a flexión que se sitúa en el entorno de los 10000-11000 N y que se obtiene, tanto para muestras curadas a 28 como a 120 días, para valores muy bajos de porcentaje de corcho (próximos a -1,68179 en valor codificado) y para valores del porcentaje de árido cercanos al central (para muestras curadas durante 120 días) o algo por encima de éste (en el caso de muestras curadas durante 28 días).
  
- Séptima: De acuerdo con el análisis estadístico puede afirmarse que no existen diferencias significativas entre los valores de resistencia a compresión determinados para las muestras que fueron curadas durante 28 y 120 días.
  
- Octava: Las superficies de respuesta y las curvas de nivel correspondientes a la resistencia a compresión en función de los porcentajes de árido y de corcho incluidos en la formulación, manteniendo constante y en su valor central el porcentaje de caliza pone de relieve la tendencia hacia un máximo (sobre todo en el caso de las muestras curadas durante 120 días) al disminuir el porcentaje de corcho y aumentar el del árido.